MODULE 09 KERNFYSICA

Kernreactoren spelen een belangrijke rol in onze elektriciteitsproductie. Ze halen meer en meer het nieuws als alternatief voor fossiele brandstoffen in de strijd tegen de klimaatopwarming. Ook in de medische wereld wordt vaak gebruikgemaakt van straling afkomstig van radioactieve kernen om diagnoses te stellen of kanker te behandelen. Nochtans hebben veel mensen schrik van alles wat met radioactiviteit te maken heeft.

?

- **Wat bedoelt men precies met 'radioactiviteit'?**
- **Worden radioactieve kernen door mensen gemaakt of komen ze ook in de natuur voor?**
- **Hoe kunnen we elektriciteit produceren door gebruik te maken van kernenergie?**
- **Hoe schadelijk is straling afkomstig van radioactieve kernen voor onze gezondheid?**

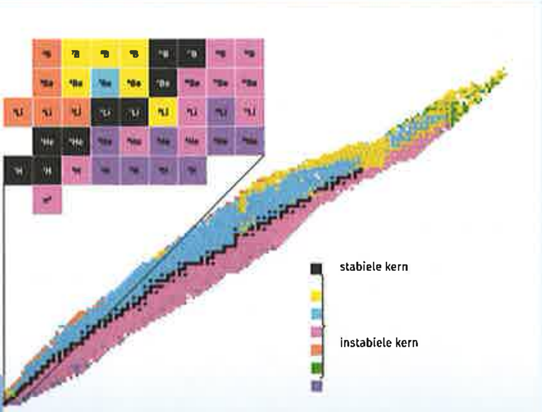
We zoeken het uit!

JE KUNT AL ...

- de bouw van een atoom omschrijven;
- de belangrijkste chemische elementen juist noteren;
- de kracht tussen (gelijksoortige) ladingen beschrijven.

- de bouw van een kern omschrijven;
- energieomzettingen beschrijven;
- voorbeelden geven van elektriciteitsopwekking met een dynamo in het dagelijks leven.

JE LEERT NU ...



H1

- de stabiliteit van een kern beschrijven aan de hand van de krachten die in de kern werken;
- het verschil tussen natuurlijke en kunstmatige radionucliden beschrijven;
- de uitdrukking $E_0 = m \cdot c^2$ toelichten;
- de stabiliteit van een kern beschrijven aan de hand van de specifieke rustenergie;
- de oorzaken van de verschillende soorten radiaoctief verval toelichten;
- de verschillende soorten radioactief verval beschrijven.

H2

- verklaren waarom er bij de fusie van lichte kernen en de splitsing van zware kernen enorme hoeveelheden energie vrijkomen;
- de werking van een kernsplitsingsreactor en de voor- en nadelen ervan beschrijven;
- het begrip 'ioniserende straling' beschrijven;
- beschermingsmaatregelen tegen ioniserende straling omschrijven;
- de grootheid sievert interpreteren;
- de meest voorkomende bronnen van ioniserende straling benoemen en beschrijven.

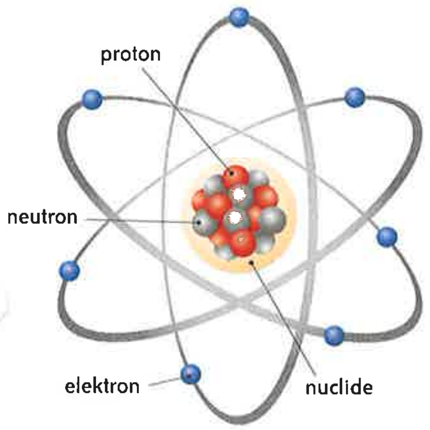
Radioactief verval

LEERDOELEN

- De stabiliteit van een kern beschrijven aan de hand van de krachten die in de kern werken
- Het verschil tussen natuurlijke en kunstmatige radionucliden beschrijven
- De uitdrukking $E_0 = m \cdot c^2$ toelichten
- De stabiliteit van een kern beschrijven aan de hand van de specifieke rustenergie
- De oorzaken van de verschillende soorten radioactief verval toelichten
- De verschillende soorten radioactief verval beschrijven

Straling die afkomstig is van radioactieve kernen, heeft vele toepassingen, zoals in de medische wereld voor diagnose en behandeling. Maar hoe ontstaat die straling? Welke soorten straling bestaan er? Wat is radioactief verval precies? Je leert het in dit hoofdstuk.

1 De bouw van een kern



Afb. 1
Voorstelling van een atoom. Een atoom bestaat uit een nuclide met protonen en neutronen en daarrond atomaire elektronen.

Kom in de video meer te weten over de ontdekking van het atoom, het proton en het neutron.

Nucleus is het Latijnse woord voor 'kern'.

1.1 Samenstelling van de kern

In 1911 ontdekte Ernest Rutherford dat een atoom bestaat uit een kleine, positief geladen kern met daarrond atomaire elektronen, die in een bijna lege ruimte rond de kern draaien. Rond 1917 kon Rutherford voor het eerst een positief kerndeeltje isoleren en identificeren. Dat deeltje noemde hij een **proton**.

Een **proton** is de **kern** van het eenvoudigste atoom, het **waterstofatoom**. Het heeft een **positieve lading**, die **tegengesteld** is aan de **lading** van het **elektron**. Zijn massa is ongeveer gelijk aan die van een waterstofatoom, maar is net iets kleiner omdat het waterstofatoom nog een atomair elektron bevat.

Het duurde tot 1932 voor James Chadwick een ander kerndeeltje, het **neutron**, kon isoleren en identificeren. Een **neutron** lijkt erg op een proton en heeft ongeveer dezelfde massa. Zoals de naam aangeeft, is het echter **elektrisch neutraal**.

Sindsdien stellen wetenschappers een **kern** voor als een samenvoeging van twee soorten deeltjes: **positieve protonen en neutrale neutronen**. Protonen en neutronen noem je 'kerndeeltjes' of **nucleonen**. Kernen noem je ook **nucliden**.

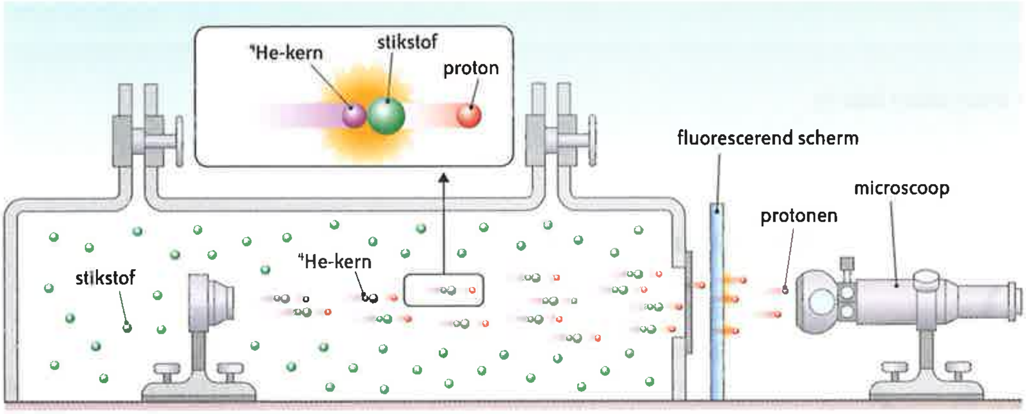
De atomaire elektronen bewegen in een wolk rond de kern. Ze verplaatsen zich niet willekeurig door die elektronenwolk, maar zijn verdeeld over een aantal schillen. In de chemie zijn die schillen van belang. In de kernfysica zijn enkel de protonen en neutronen in de kern belangrijk. Omdat de massa van de protonen en neutronen veel groter is dan de massa van de elektronen, bevat de nuclide bijna al de massa van het atoom.

ATOMAIR DEELTJE	PLAATS	SYMBOOL	RUSTMASSA	ELEKTRISCHE LADING
proton	kern	p^+	$1{,}67262 \cdot 10^{-27}$ kg	$+e = +1{,}60 \cdot 10^{-19}$ C
neutron	kern	n^0	$1{,}67493 \cdot 10^{-27}$ kg	0
elektron	wolk	e^-	$9{,}1095 \cdot 10^{-31}$ kg	$-e = -1{,}60 \cdot 10^{-19}$ C

WEETJE

Zowel het proton als het neutron werd ontdekt tijdens botsingsexperimenten.

- Rutherford bombardeerde stikstofgas met ^{4}He-kernen. Hij detecteerde zuurstof en een nieuw deeltje: het proton.
- Chadwick bombardeerde beryllium met ^{4}He-kernen. Hij detecteerde (naast andere deeltjes) het neutron.



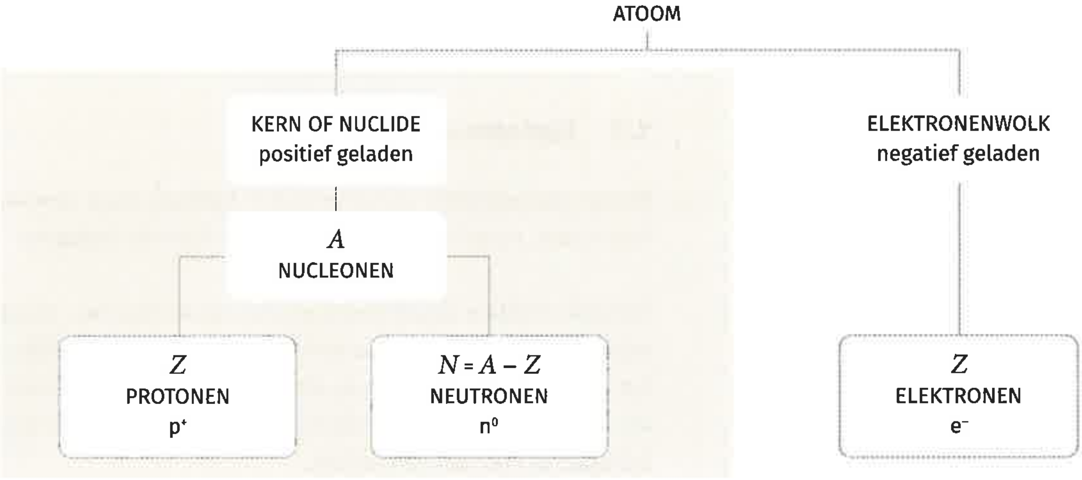
Afb. 2
De opstelling voor het botsingsexperiment van Rutherford

Chadwick ontving in 1935 de Nobelprijs voor zijn ontdekking van het neutron. Ook Rutherford kreeg de Nobelprijs, maar niet voor zijn ontdekking van het proton. Hij ontving de prijs al in 1908 voor 'zijn onderzoek naar het uiteenvallen van elementen en de scheikunde van radioactieve substanties'.

Alle kernen bevatten zowel protonen als neutronen, behalve de waterstofkern. Die bestaat uit 1 proton.

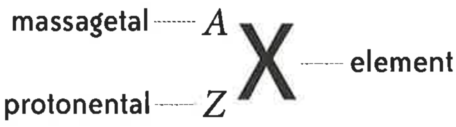
- Het totale aantal nucleonen in de kern duid je aan met het **massagetal** A. Dat getal noem je soms ook het **nucleonental**.
- Het **protonental** Z geeft het aantal protonen in de kern aan. In de chemie noem je Z het atoomnummer. In een neutraal atoom is het aantal atomaire elektronen gelijk aan het protonental Z. Daarom bepaalt het protonental om welk chemisch element het gaat.
  Zo heeft koolstof 6 protonen, stikstof 7 protonen, zuurstof 8 protonen, lood 82 protonen enzovoort.
- Het aantal neutronen van de nuclide wordt weergegeven door het **neutronental** N. Er geldt: $N = A - Z$.

GROOTHEID	SYMBOOL	BETEKENIS	FORMULE
massagetal	A	aantal nucleonen	
protonental	Z	aantal protonen	$N = A - Z$
neutronental	N	aantal neutronen	



Afb. 3
De opbouw van een atoom. In dit hoofdstuk focus je op de kern of nuclide.

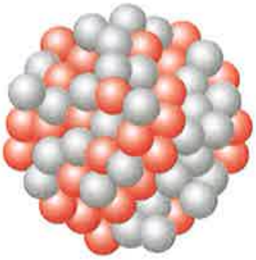
De kern van element X met massagetal A en protonental Z noteer je vaak als $^{A}_{Z}X$:



Door de een-op-eenrelatie tussen het protonental en het chemisch element is het protonental Z overbodig in die notatie. Daarom kun je een kern ook noteren als ^{A}X.

VOORBEELD IJZERKERN

$^{56}_{26}Fe$ spreek je uit als 'ijzer-56'.
Dat staat voor een ijzerkern met 56 nucleonen (A = 56), waarvan 26 protonen (Z = 26) en 30 neutronen (N = 30). Je kunt 'ijzer-56' ook noteren als ^{56}Fe.



Afb. 4
Een 56Fe-kern

- Een atoom bestaat uit een **nuclide** en atomaire elektronen. De nuclide bestaat uit Z **protonen** en N **neutronen**, waarbij Z **het protonental** en N **het neutronental** is. Protonen en neutronen noem je ook **nucleonen**. Een nuclide bevat A nucleonen, waarbij A **het massagetal** of **nucleonental** is. Er geldt: $N = A - Z$.
- De **nuclide van element X** met **massagetal** A en **protonental** Z noteer je vaak als $^{A}_{Z}\mathrm{X}$ of soms nog korter als $^{A}\mathrm{X}$.

1.2 Isotope nucliden

Het begrip 'isotoop' is een samentrekking van twee Griekse woorden: *ἴσος* (*isos*, 'gelijk') en *τοπος* (*topos*, 'plaats'). Die samentrekking benadrukt dat de verschillende isotopen van een element dezelfde plaats innemen in het periodiek systeem.

Kernen die hetzelfde aantal protonen hebben, maar een verschillend aantal neutronen, noem je **isotope nucliden** of kortweg **isotopen**.

Isotopen hebben dezelfde chemische eigenschappen, omdat ze hetzelfde aantal atomaire elektronen bezitten. Ze staan op dezelfde plaats in het periodiek systeem van de elementen. Natuurlijk helium kan bijvoorbeeld voorkomen als $^{4}\mathrm{He}$ en als $^{3}\mathrm{He}$. Om de fysica van de kern te begrijpen, zijn isotopen echter wel van belang.

VOORBEELD NATUURLIJKE KOOLSTOFISOTOPEN

Koolstof bevat drie natuurlijke isotopen: $^{12}\mathrm{C}$, $^{13}\mathrm{C}$ en $^{14}\mathrm{C}$. Het percentage aan $^{14}\mathrm{C}$ is bijzonder klein, maar kan toch van belang zijn: die isotoop gebruiken wetenschappers om historische voorwerpen te situeren in de tijd. Zo werd de ouderdom van de mummie van Toetanchamon bepaald via de koolstof 14-dateringsmethode. De mummie dateert van (ongeveer) 1323 voor Christus.

Afb. 5
Het gouden grafmasker van Toetanchamon

	NATUURLIJKE KOOLSTOFISOTOPEN		
	$^{12}\mathrm{C}$	$^{13}\mathrm{C}$	$^{14}\mathrm{C}$
Z	6	6	6
N	6	7	8
Procentueel voorkomen	98,9 %	1,1 %	0,000 000 000 1 %

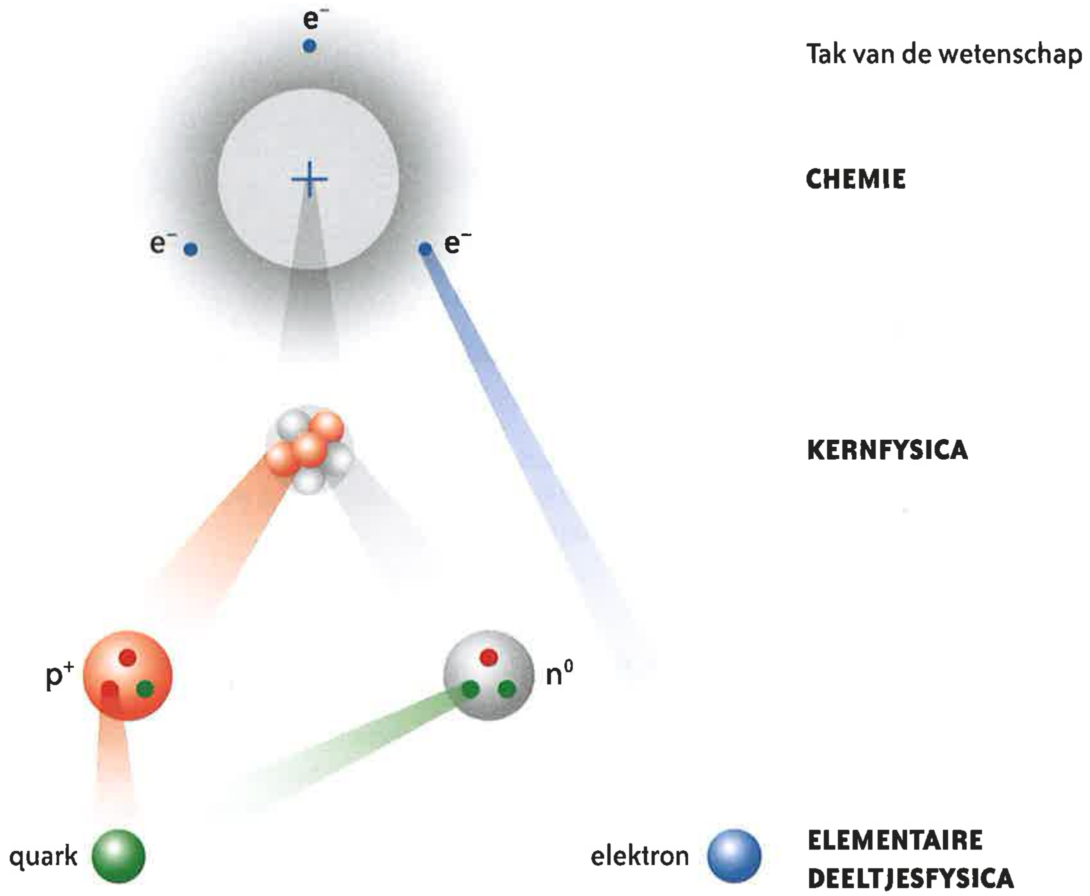
Afb. 6
De kernen van drie koolstofisotopen

Isotope nucliden of **isotopen** zijn kernen met **hetzelfde protonental** Z, maar een **verschillend neutronental** N.

1.3 De kleinste bouwstenen

In de jaren vijftig en zestig ontdekten fysici dat neutronen en protonen uit nog kleinere deeltjes zijn opgebouwd: de **quarks**. Voor zover wetenschappers tot nu toe weten, zijn quarks en deeltjes zoals het elektron niet samengesteld uit nog kleinere deeltjes. Daarom noem je ze **fundamentele deeltjes** of **elementaire deeltjes**.

Er ontstond een nieuwe, fascinerende tak binnen de fysica: de **elementaire deeltjesfysica**.



▲ Afb. 7
De verschillende deeltjes in een atoom en hun afmetingen

Fundamentele of **elementaire deeltjes** zijn niet samengesteld uit nog kleinere deeltjes.

- Het **elektron** is een **fundamenteel deeltje**.
- **Protonen** en **neutronen** zijn **samengesteld** uit **quarks**.
  Protonen en neutronen zijn dus geen fundamentele deeltjes.
  Quarks zijn wel fundamentele deeltjes.

video: Large Hadron Collider

WEETJE

Wetenschappers onderzoeken de fundamentele deeltjes door in deeltjesversnellers protonen te versnellen tot ze bijna de lichtsnelheid bereiken, en ze dan met elkaar te laten botsen. De 'brokstukken' van die botsingen worden opgespoord door grote detectoren. Zowel de creatie van een protonenbotsing aan hoge snelheid, de detectie van de 'brokstukken', als de interpretatie van de experimentele gegevens in termen van fundamentele deeltjes is een waar huzarenstukje.

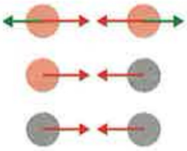
▲ Afb. 8
Een deel van de *Large Hadron Collider* in CERN

Een van de bekendste deeltjesversnellers is de *Large Hadron Collider* in CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*), gelegen in Genève, Zwitserland.

1.4 De sterke kernkracht

Het is vreemd dat een verzameling protonen en neutronen een stabiele kern kan vormen. Alle protonen hebben immers dezelfde positieve elektrische lading en stoten elkaar dus af door de **elektrische kracht** $F_c = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$. Ze werkt **tussen alle protonen in een nuclide**.

Een stabiele nuclide kan dan ook alleen maar bestaan als er nog een andere, aantrekkende kracht aanwezig is, die de nucleonen bij elkaar houdt. Omdat die kracht sterker is dan de elektrische kracht, wordt ze de **sterke kernkracht** genoemd. De sterke kernkracht is **sterk aantrekkend** tussen nucleonen (protonen en/of neutronen) in een kern.



◄ Afb. 9
De sterke kernkracht tussen nucleonen (rood) en de elektrische kracht tussen protonen (groen)

De **stabiliteit** van een atoomkern wordt bepaald door de **aantrekkende sterke kernkracht tussen de nucleonen** enerzijds en de **afstotende elektrische kracht tussen de protonen** anderzijds.

2 De nuclidenkaart

2.1 Stabiele kernen op de nuclidenkaart

In de chemie gebruik je het periodiek systeem van de elementen (PSE). Atomen zijn er geordend volgens hun atoomnummer Z. De verschillende isotopen van één element zijn niet afzonderlijk opgenomen in het PSE.

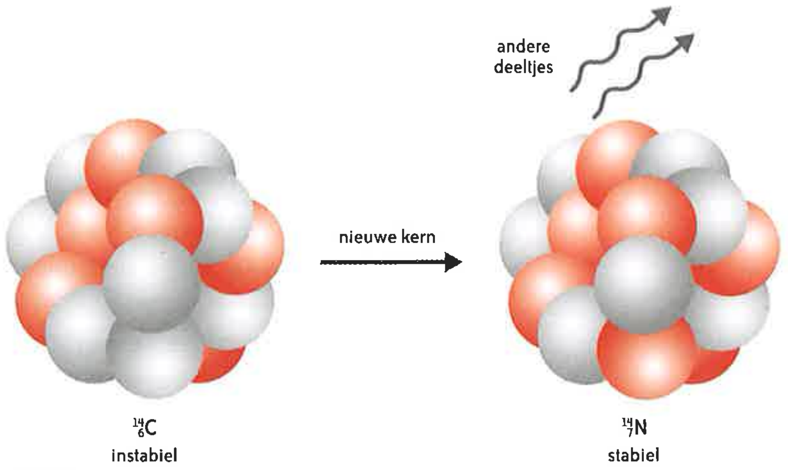
Voor de kernfysica zijn de verschillende isotopen wel van belang. Wetenschappers ordenen ze op de zogenoemde **nuclidenkaart**. Dat is een grafiek met op de horizontale as het neutronental N en op de verticale as het protonental Z (soms ook omgekeerd). Alle kernen, gekarakteriseerd door N en Z, krijgen er hun unieke plaatsje. Isotopen van hetzelfde element hebben dezelfde waarde voor Z en staan daarom in dezelfde horizontale rij.

Sommige kernen zijn **stabiel** en zullen niet spontaan hun protonental Z of hun neutronental N veranderen. Andere kernen hebben te veel energie en zijn **instabiel**. Een instabiele kern kan spontaan naar een stabielere toestand overgaan door haar protonental Z en/of haar neutronental N aan te passen. De stabiele nucliden vormen de **stabiliteitsband** op de nuclidenkaart. Of een kern stabiel of instabiel is, wordt bepaald door het aantal neutronen en protonen in de kern.

VOORBEELD SPONTAAN VERVAL VAN $^{14}_{6}C$ NAAR $^{14}_{7}N$

$^{14}_{6}C$ is een instabiele kern. Ze vervalt spontaan tot $^{14}_{7}N$ door een neutron om te zetten in een proton. ^{14}N is wel een stabiele kern en zal haar protonen- en neutronental niet spontaan veranderen.

Wetenschappers kunnen bepaalde historische voorwerpen situeren in de tijd met behulp van ^{14}C, juist doordat ^{14}C instabiel is. Het aantal ^{14}C-isotopen in die voorwerpen neemt af in functie van de tijd en is dus een maat voor de ouderdom van die voorwerpen.



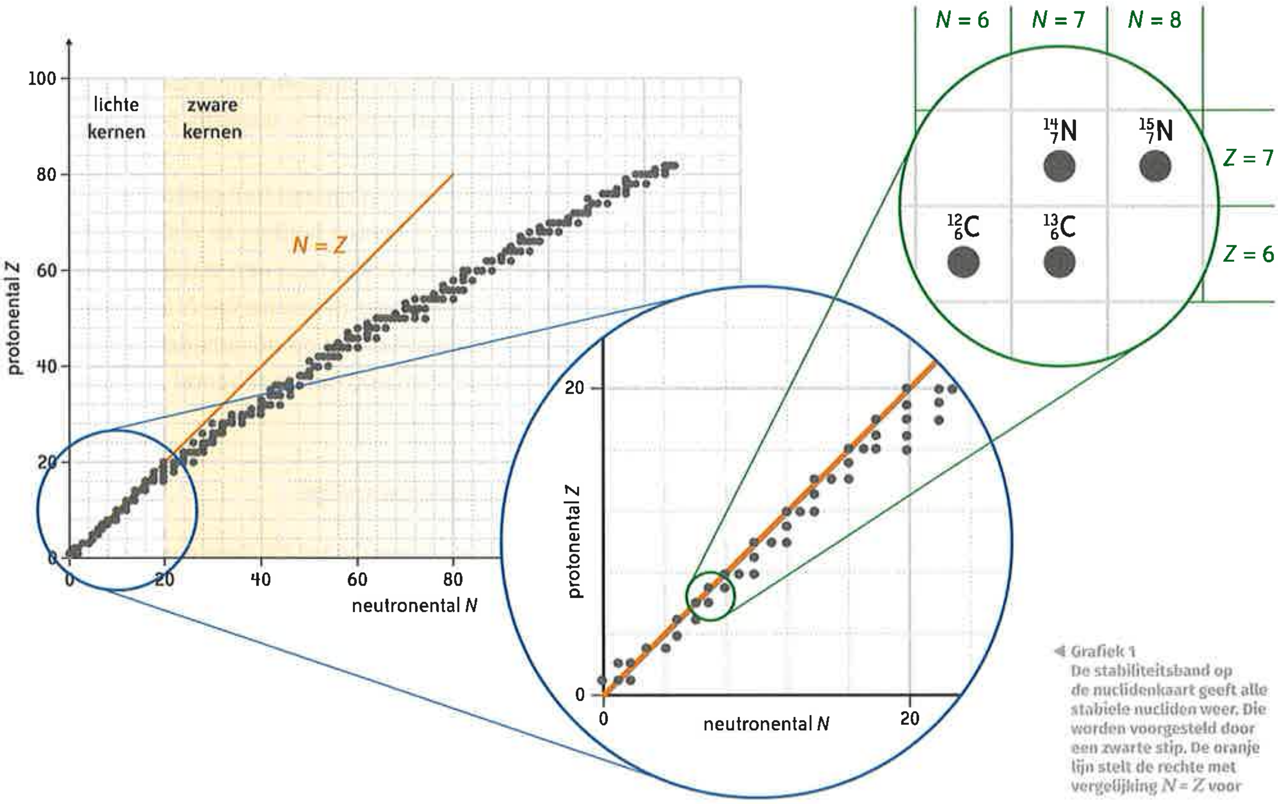
▲ Afb. 10
Een instabiele 146C-kern vervalt spontaan tot een stabiele 147N-kern.

Grafiek 1 toont de stabiliteitsband op de nuclidenkaart: alleen de stabiele nucliden worden weergegeven. Later breiden we de nuclidenkaart uit met de instabiele nucliden.

Op de nuclidenkaart worden stabiele nucliden meestal voorgesteld met een zwarte stip of een zwart vakje.

- Nucliden met hetzelfde protonental Z, bijvoorbeeld $^{14}_{7}$Ni en $^{15}_{7}$Ni, staan in dezelfde rij.
- Nucliden met hetzelfde neutronental N, bijvoorbeeld $^{14}_{7}$Ni en $^{13}_{6}$C, staan in dezelfde kolom.

Je kunt die voorbeelden zien op de groene uitvergroting van de grafiek.



◀ Grafiek 1
De stabiliteitsband op de nuclidenkaart geeft alle stabiele nucliden weer. Die worden voorgesteld door een zwarte stip. De oranje lijn stelt de rechte met vergelijking $N = Z$ voor

Uit de stabiliteitsband op de nuclidenkaart kun je een algemene tendens afleiden:

- **Lichte stabiele kernen (Z < 20)** bevatten (ongeveer) evenveel protonen als neutronen. De grafiek volgt bij benadering de rechte met vergelijking $N = Z$ (zie uitvergroting in de blauwe cirkel op de grafiek). Voor die kernen geldt: $N \approx Z$.
  $^{12}_{6}$C, $^{13}_{6}$C, $^{14}_{7}$N en $^{15}_{7}$N zijn voorbeelden van lichte stabiele kernen.
  Voor die kernen geldt dat N en Z (ongeveer) gelijk zijn aan elkaar.
- **Zwaardere stabiele kernen (Z > 20)** bevatten meer neutronen dan protonen. De grafiek volgt de rechte met vergelijking $N = Z$ niet meer. Voor die kernen geldt: $N > Z$. Bij zwaardere kernen zijn dus meer neutronen dan protonen nodig om de elektrische afstotingskracht te overwinnen.
  Er bestaan veel voorbeelden van dergelijke stabiele kernen: $^{107}_{47}$Ag, $^{197}_{79}$Au, $^{208}_{82}$Pb ...

Stabiele kernen zijn kernen die niet spontaan hun protonental Z of hun neutronental N veranderen.
Instabiele kernen hebben te veel energie en gaan over naar een stabiele toestand door hun protonental Z en/of hun neutronental N aan te passen.

- Voor **lichte stabiele kernen** ($Z < 20$) geldt bij benadering: $N \approx Z$.
- Voor **zwaardere stabiele kernen** ($Z > 20$) geldt: $N > Z$.

2.2 De volledige nuclidenkaart

De stabiliteit van een kern wordt in hoge mate bepaald door het protonental Z en het neutronental N. Zowel een teveel aan protonen als een teveel aan neutronen leidt tot instabiele kernen. Ze zullen hun **protonental Z en/of hun neutronental N veranderen** en zo tot een nieuwe kern met een andere samenstelling vervallen. Dat noem je **radioactief verval**. Een instabiele nuclide wordt daarom soms ook een **radionuclide** genoemd. Door radioactief te vervallen, **verlaagt de radionuclide haar energie**. Het energieverschil komt vrij doordat de nuclide straling uitzendt in de vorm van deeltjes of elektromagetische golven (*radiation* in het Engels).

Sommige radionucliden komen in de natuur voor en zijn niet het gevolg van menselijke activiteit, bijvoorbeeld ^{235}U of ^{14}C. Je noemt ze **natuurlijke radionucliden**.
Andere radionucliden worden door de mens in laboratoria gemaakt. Dat zijn **kunstmatige radionucliden**.

WEETJE

Voor alle elementen tot en met $_{83}\text{Bi}$ is er minstens één stabiele isotoop, met uitzondering van $_{43}\text{Tc}$ (technetium) en $_{61}\text{Pm}$ (promethium).
Alle nucliden met $Z > 83$ zijn instabiel.

De elementen tussen $_{84}\text{Po}$ (polonium) en $_{92}\text{U}$ (uranium) bevatten natuurlijke radionucliden.

Alle isotopen met $Z \geq 93$ zijn door de mens gemaakt in laboratoria.
Dat zijn allemaal kunstmatige radionucliden.

TIP

Gebruik de applet om zelf stabiele en instabiele kernen (en atomen) te bouwen.

VOORBEELD NATUURLIJKE RADIONUCLIDEN

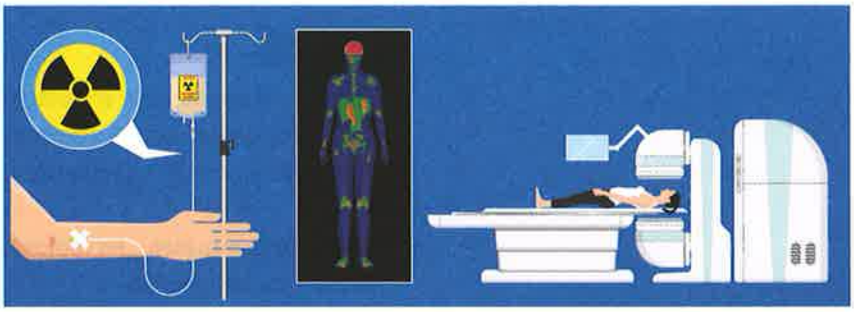
De aardkorst bevat verschillende natuurlijke radionucliden, bijvoorbeeld ^{238}U (uranium-238), ^{232}Th (thorium-232) en ^{40}K (kalium-40).

▲ Afb. 11
Aeschyniet is een mineraal dat yttrium, cerium, calcium, thorium, niobium, titanium, zuurstof en waterstof bevat. Omdat natuurlijk thorium radioactief is, is ook aeschyniet radioactief. Je vindt het mineraal onder andere in de Alpen.

▲ Afb. 12
In kerncentrales gebruikt men natuurlijk uraniumerts in verrijkte vorm.

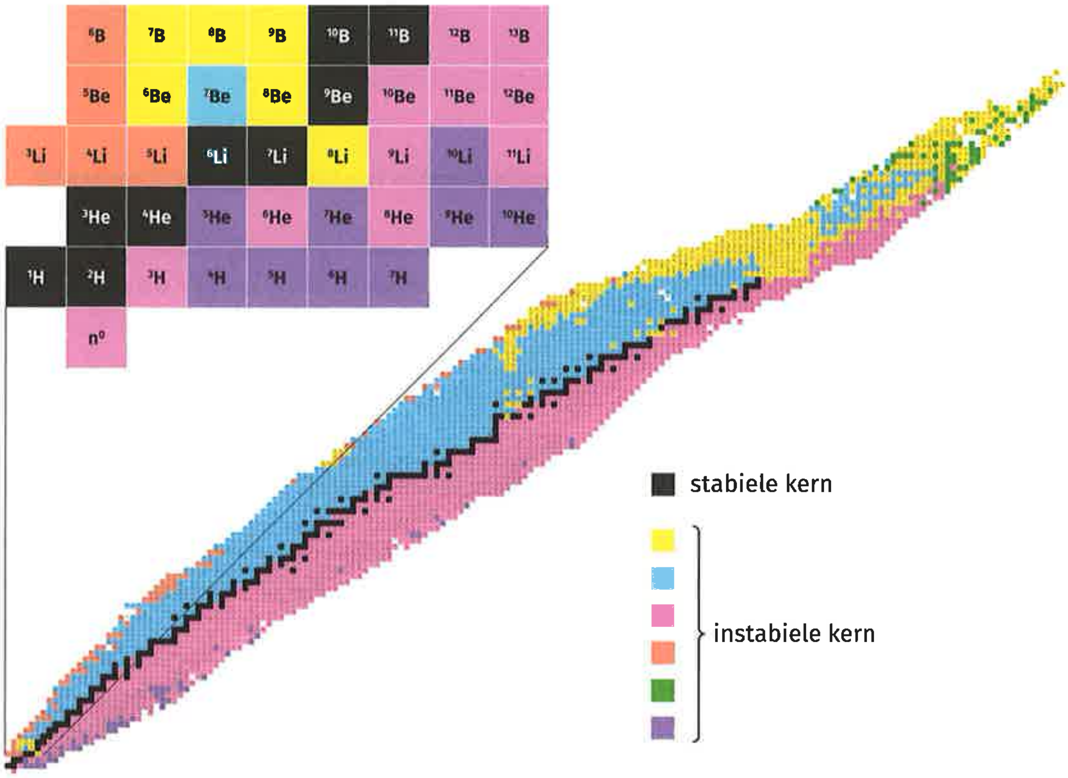
VOORBEELD KUNSTMATIGE RADIONUCLIDEN

Kunstmatige radionucliden worden soms aangemaakt voor wetenschappelijke doeleinden. Ze hebben echter vaak ook een praktisch nut. Zo gebruikt men in de medische wereld veel kunstmatige radionucliden, onder andere voor medische beeldvorming en voor de behandeling van kanker. Voorbeelden zijn ^{18}F (fluor-18) en ^{131}I (jodium-131).



▲ Afb. 13
Voor medische doeleinden gebruikt men vaak kunstmatige radionucliden.

De volledige nuclidenkaart (grafiek 2) bevat alle stabiele en instabiele nucliden. De stabiele nucliden worden voorgesteld door zwarte vakjes, de instabiele nucliden door gekleurde.



▲ Grafiek 2
De volledige nuclidenkaart. Stabiele nucliden worden in het zwart voorgesteld, radionucliden met een kleur. De verschillende kleurencodes geven de verschillende soorten radioactief verval weer. In professionele labo's zul je de nuclidenkaart in deze vorm en met dezelfde kleurencodes terugvinden.

Nucleonen boven de stabiliteitsband hebben te veel protonen in verhouding tot het aantal neutronen om stabiel te zijn. Ze zetten een proton om in een neutron en worden op de nuclidenkaart voorgesteld in het blauw (bijvoorbeeld ^{18}F).
Nucleonen onder de stabiliteitsband hebben te veel neutronen in verhouding tot het aantal protonen om stabiel te zijn. Ze zetten een neutron om in een proton en worden op de nuclidenkaart voorgesteld in het roze (bijvoorbeeld ^{40}K en ^{131}I).
Elke kleur op de nuclidenkaart staat symbool voor de manier waarop de instabiele kern vervalt.

Tijdens experimenten ontdekken wetenschappers nog altijd nieuwe radioactieve isotopen. De nuclidenkaart wordt dan ook regelmatig aangepast aan de recentste status van het wetenschappelijk onderzoek.

In de natuur bestaan er **stabiele nucliden** en **natuurlijke radionucliden**.
In laboratoria maakt men ook **kunstmatige radionucliden**.
Radionucliden zijn instabiele kernen die bij radioactief verval straling uitzenden.

3 De specifieke rustenergie

3.1 Equivalentie tussen massa en energie

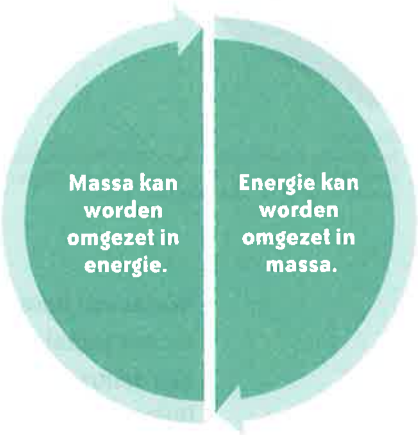
De rustenergie van een kern is de minimale energie die een kern kan hebben.

Einstein leidde in zijn speciale relativiteitstheorie af dat een massa in rust overeenkomt met een hoeveelheid energie die hij de **rustenergie E_0** noemde:
$E_0 = m \cdot c^2$

Daarbij is c de lichtsnelheid: $c = 2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^8\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

GROOTHEID MET SYMBOOL		EENHEID MET SYMBOOL	
rustenergie	E_0	joule	J

Een korte berekening in de speciale relativiteitstheorie leidde dus tot een spectaculaire ontdekking:

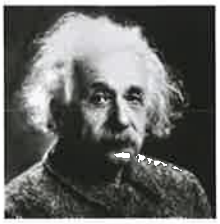


Als **massa** wordt **omgezet in energie**, dan komt die energie vrij in de vorm van **straling** en/of **warmte**. Dat neem je waar bij kernen. Wanneer losse protonen en neutronen samen een kern vormen, gaat er altijd een beetje massa verloren, namelijk het massadefect Δm. Die massa wordt omgezet in energie. De hoeveelheid gevormde energie kun je berekenen met de wet $\Delta E_0 = \Delta m \cdot c^2$.

Het verband tussen de rustenergie en een massa in rust wordt gegeven door de formule $E_0 = m \cdot c^2$. Dat betekent dat **massa** kan worden **omgezet in energie** en **energie in massa**.
Wanneer **massa** wordt **omgezet in energie**, dan komt die energie vrij in de vorm van **straling** en/of **warmte**. De **rustenergie van een kern** is de **minimale energie** die een kern kan hebben.

WEETJE

Albert Einstein won in 1920 de Nobelprijs.
Hij kreeg de prijs echter niet voor zijn pionierswerk in de relativiteitstheorie, maar wel voor zijn verklaring van het foto-elektrisch effect als een kwantummechanisch fenomeen.



▲ Afb. 14

3.2 De specifieke rustenergie

Binnen de kernfysica gebruikt men meestal niet de joule als eenheid voor de rustenergie van een kern, maar wel de mega-elektronvolt (MeV).
1 eV (elektronvolt) = 1,602 176 5 · 10^{-19} J en
1 MeV = 10^6 eV = 1,602 176 5 · 10^{-13} J.

De massa van kernen wordt meestal niet uitgedrukt in kg, maar wel in de **atomaire massa-eenheid u**.

De atomaire massa-eenheid u = $\frac{\text{massa van een } ^{12}_{6}\text{C-atoom}}{12}$ = 1,660 54 · 10^{-27} kg.

GROOTHEID MET SYMBOOL		EENHEID MET SYMBOOL		VERBAND MET SI-EENHEDEN
rustenergie	E_0	mega-elektronvolt	MeV	1,602 176 5 · 10^{-13} J
massa	m	atomaire massa-eenheid	u	1,660 54 · 10^{-27} kg

De rustenergie van een kern kun je berekenen met de massa-energierelatie van Einstein: $E_0 = m \cdot c^2$. Ze wordt groter naarmate de kern meer nucleonen bevat.

Om de energie van verschillende kernen te kunnen vergelijken, is het daarom interessanter om de gemiddelde rustenergie van een nucleon in de kern te berekenen. **De gemiddelde rustenergie van een nucleon in een kern** noem je de **specifieke rustenergie** van een kern of de **rustenergie per nucleon**. Je bekomt de specifieke rustenergie van een kern door de rustenenergie van die kern te delen door het nucleonental A.

Elk (micro- en macroscopisch) systeem streeft naar minimale inwendige energie. Er vinden processen plaats totdat het systeem die evenwichtstoestand heeft bereikt.

GROOTHEID MET SYMBOOL		EENHEID MET SYMBOOL	
specifieke rustenergie of rustenergie per nucleon	$\frac{E_0}{A}$	mega-elektronvolt	MeV

Zoals alle microscopische en macroscopische systemen, streven kernen naar **minimale inwendige energie** en dus naar **minimale rustenergie** en **minimale specifieke rustenergie**. Hoe **lager de specifieke rustenergie** van een kern, hoe **stabieler** ze is.

De **specifieke rustenergie** van een kern is gelijk aan $\frac{E_0}{A}$, waarbij E_0 de rustenergie van de kern is en A het nucleonental. Het is de gemiddelde rustenergie van een nucleon in de kern.
Hoe **lager de specifieke rustenergie** van een kern, hoe **stabieler** ze is.

4 Radioactief verval

4.1 Straling bij radioactief verval

In 1896 deed Henri Becquerel een belangrijke ontdekking: uraniumertsen zenden spontaan, zonder beïnvloeding van buitenaf, straling uit die een fotografische plaat zwart kleurt. Al snel ontdekten Marie en Pierre Curie nog twee andere, tot dan toe onbekende, elementen die spontaan straling uitzenden. De elementen kregen de namen polonium en radium. Het verschijnsel kreeg de naam **radioactiviteit**.

'Radioactiviteit' komt van het Latijnse woord *radius*, dat 'straal' betekent, en het woord 'actief'. Het begrip werd bedacht door Marie Curie.

Radioactiviteit is het proces waarbij **instabiele nucliden vervallen** naar andere (stabiele of instabiele) nucliden, om zo hun **energie te verlagen**. Instabiele kernen zenden tijdens hun verval **straling** uit en worden daarom **radioactieve kernen** genoemd. Materiaal dat radioactieve kernen bevat, noem je een **stralingsbron**.

Straling is een vorm van **energieoverdracht** waarbij **elektromagnetische golven** of **deeltjes** worden uitgestuurd:

- Elektromagnetische golven zijn golven die geen middenstof nodig hebben om zich voort te planten. Een voorbeeld daarvan is zichtbaar licht.
- Bij deeltjesstraling gaat het om hoogenergetische deeltjes die maximaal de grootte van een nuclide hebben, bijvoorbeeld elektronen, neutronen, protonen of ^{4}He-kernen. Ook elektromagnetische golven worden soms voorgesteld als deeltjes. Die deeltjes noem je **fotonen**. Je kunt dus zeggen dat zichtbaar licht uit fotonen bestaat.

- **Radioactiviteit** is het proces waarbij **instabiele nucliden vervallen** naar andere (stabiele of instabiele) nucliden. Ze zenden daarbij straling uit.
- **Straling** is een vorm van **energieoverdracht** waarbij **elektromagnetische golven** of **deeltjes** worden uitgezonden.

WEETJE

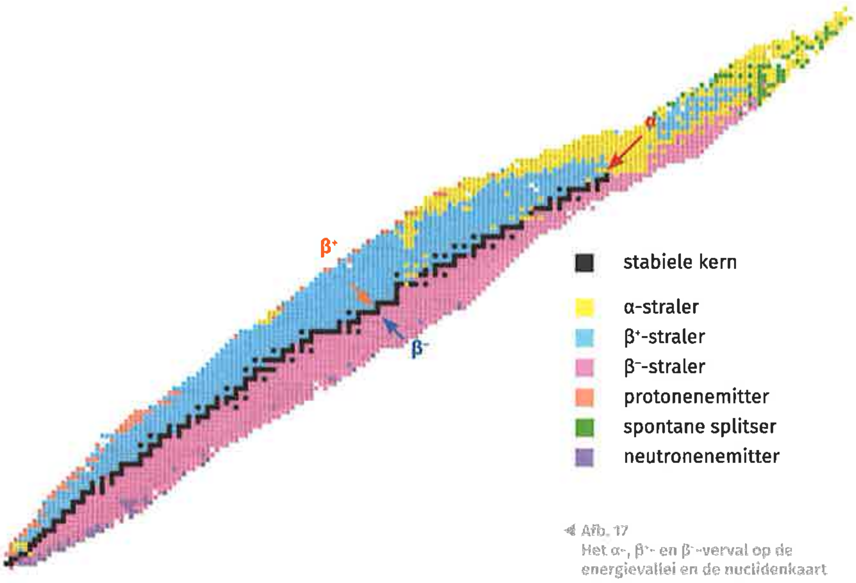
In 1903 kregen Henri Becquerel en Pierre en Marie Curie samen de Nobelprijs. Becquerel kreeg de prijs 'ter erkenning van de buitengewone diensten die hij heeft verricht door zijn ontdekking van spontane radioactiviteit' en Pierre en Marie Curie 'voor hun onderzoek naar de stralingsverschijnselen ontdekt door Henri Becquerel'.
Acht jaar later ontving Marie Curie opnieuw de Nobelprijs, deze keer voor scheikunde 'als erkenning voor haar diensten ter bevordering van de scheikunde door de ontdekking van de elementen radium en polonium, door de isolatie van radium en de studie van de aard en samenstelling van dat opmerkelijke element'.
Marie Curie was de eerste vrouw die de Nobelprijs in ontvangst mocht nemen, en een van de vijf wetenschappers die de prijs twee keer mochten ontvangen.

▲ Afb. 15
Pierre en Marie Curie in hun laboratorium

▲ Afb. 16
Henri Becquerel in zijn laboratorium

4.2 De verschillende soorten radioactief verval

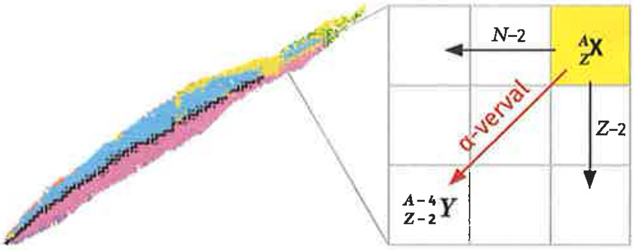
Instabiele kernen kunnen hun **specifieke rustenergie verlagen** door **radioactief te vervallen richting de stabiliteitsband**. De soort straling die vrijkomt bij het radioactief verval, hangt af van de oorzaak van de instabiliteit van de kern. Het is de samenstelling van de kern (het aantal protonen Z en het aantal neutronen N) die bepaalt waarom de kern instabiel is en hoe de kern zal vervallen. Je kunt het soort verval van een kern aflezen op de nuclidenkaart.



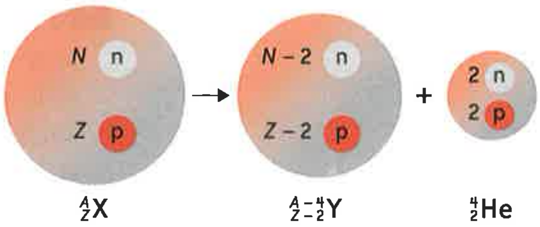
Afb. 17
Het α-, β⁺- en β⁻-verval op de energievallei en de nuclidenkaart

1 α-verval

Kernen met meer dan 82 protonen zijn instabiel, omdat ze **te veel nucleonen** bevatten. De sterke kernkracht is niet meer in staat om ze bij elkaar te houden. Zware kernen kunnen hun energie verminderen door hun **aantal nucleonen** (protonen én neutronen) te **verminderen**. Meestal gebeurt dat via α-verval, waarbij een **$^{4}_{2}$He-kern** wordt afgestoten. Het nucleonental A vermindert met 4, het protonental Z met 2 en het neutronental N met 2. Op de nuclidenkaart zijn α-stralers geel gekleurd. ^{222}Rn (radon-222) is een voorbeeld van een α-straler.



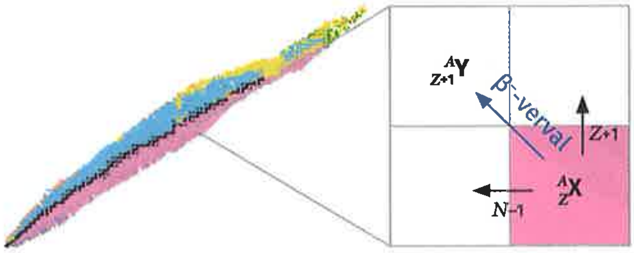
Afb. 18
α-verval op de nuclidenkaart



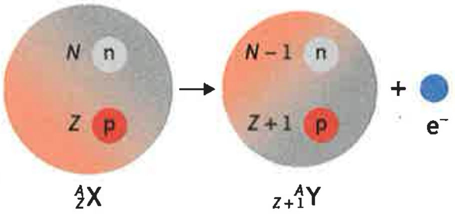
Afb. 19
De nucleaire reactievergelijking voor α-verval

2 β-verval

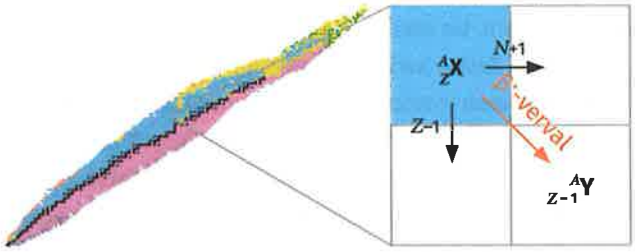
De flanken boven en onder de stabiliteitsband worden gevormd door kernen met een **teveel** aan **neutronen** (bijvoorbeeld **^{40}K**, kalium-40) of een **teveel** aan **protonen** (bijvoorbeeld **^{18}F**, fluor-18). Kernen met te veel neutronen kunnen hun specifieke rustenergie verminderen door een **neutron om te zetten in een proton** (de roze kernen op de nuclidenkaart). Ze vervallen via **β⁻-verval**. Op een analoge manier kunnen kernen met te veel protonen hun specifieke rustenergie verminderen door een **proton om te zetten in een neutron** (de blauwe kernen op de nuclidenkaart). Ze vervallen via **β⁺-verval**.
Bij β⁻-verval komt een elektron vrij. Het neutronental N vermindert met 1 en het protonental Z stijgt met 1. Bij β⁺-verval komt een positron vrij. Het protonental Z daalt met 1 en het neutronental N stijgt met 1. Een positron lijkt erg op een elektron. Ze hebben dezelfde massa en dezelfde ladingsgrootte. Een belangrijk verschil tussen het elektron en het positron is dat het elektron een negatieve lading heeft en het positron een positieve lading e^+.



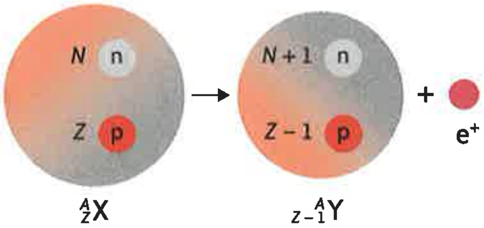
▲ Afb. 20
β⁻-verval op de nuclidenkaart



▲ Afb. 21
De nucleaire reactievergelijking voor β⁻-verval



▲ Afb. 22
β⁺-verval op de nuclidenkaart



▲ Afb. 23
De nucleaire reactievergelijking voor β⁺-verval

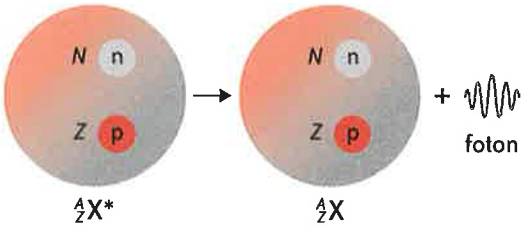
+ VERDIEPING

Bij β⁺-verval komt niet alleen een positron vrij, maar ook een neutrino. Bij β⁻-verval komt naast een elektron ook een anti-neutrino vrij. Neutrino's en anti-neutrino's hebben geen lading en een massa die zo klein is dat men lange tijd dacht dat ze helemaal geen massa hadden. Daardoor zijn ze heel moeilijk te detecteren.

3 γ-verval

Er bestaat ook een type verval waarbij het **protonental Z** en het **neutronental N ongewijzigd** blijven: het γ-verval. Omdat N en Z ongewijzigd blijven, zijn γ-stralers niet terug te vinden op de nuclidenkaart.

Vóór het γ-verval heeft de nuclide een (totale) energie die hoger is dan haar (totale) rustenergie. Bij γ-verval verlaagt een kern haar energie door **hoogenergetische fotonen** (dat wil zeggen: **hoogenergetische elektromagnetische straling**) uit te zenden. Op die manier verlaagt de kern haar energie tot haar rustenergie bereikt is, zonder N of Z te wijzigen. Alle kernen kunnen meer energie bezitten dan hun rustenergie en via γ-verval vervallen, maar dikwijls volgt γ-verval op α-verval of β-verval.



▲ Afb. 24
γ-verval van een kern

4 Andere vormen van verval

Soms verminderen zware kernen hun specifieke rustenergie ook door **spontane splitsing**. Die kernen zijn groen gekleurd op de nuclidenkaart. Kernen aan de rand van de nuclidenkaart kunnen ook vervallen door een **proton af** te **stoten** (oranje kernen op de nuclidenkaart) of een **neutron af** te **stoten** (paarse kernen op de nuclidenkaart).

Er bestaan verschillende soorten radioactief verval, omdat kernen om verschillende redenen instabiel kunnen zijn.

- Zware kernen vervallen meestal via **α-verval**, omdat ze **te veel nucleonen** hebben. Ze verlagen hun specifieke rustenergie door een **$^{4}_{2}$He-kern** af te stoten en op die manier hun aantal nucleonen te verminderen.
- Kernen met **te veel neutronen** vervallen door een **neutron om te zetten in een proton**. Daarbij komt er een elektron vrij. Dat noem je ook **β^--verval**.
- Kernen met **te veel protonen** vervallen door een **proton om te zetten in een neutron**. Daarbij komt er een positron vrij. Dat noem je ook **β^+-verval**.
- Kernen kunnen ook vervallen **zonder hun protonental Z of neutronental N te wijzigen**. Dat is het geval wanneer hun **energie groter** is **dan hun rustenergie**. Ze vervallen dan via **γ-verval** en zenden een **hoogenergetisch foton** uit.

AAN DE SLAG

1 Welke kenmerken onderscheiden de verschillende elementen in het PSE?
(Er kunnen meerdere antwoorden juist zijn.)

- ☐ het aantal elektronen in de kern
- ☐ het aantal atomaire elektronen in het neutrale atoom
- ☐ het aantal protonen in de kern
- ☐ het aantal neutronen in de kern
- ☐ het totale aantal kerndeeltjes

2 Bepaal voor de nuclide ^{226}Ra:

a het nucleonental: ______________

b het protonental: ______________

c het neutronental: ______________

3 Bepaal voor de nuclide $^{16}_{7}X$:

a het aantal nucleonen: ______________

b het aantal protonen: ______________

c het aantal neutronen: ______________

Welk chemisch element is X? ______________

4 Rangschik de nucliden ^{29}P, ^{27}Si, ^{28}Si, ^{29}Si en ^{27}Al:

a volgens toenemend aantal nucleonen:

____

b volgens toenemend aantal protonen:

____

c volgens toenemend aantal neutronen:

____

5 Een nuclide van element X is opgebouwd uit 29 protonen en 25 neutronen.

a Uit hoeveel nucleonen bestaat die nuclide? ______________

b Welk chemisch element is X? ______________

c Is de nuclide stabiel of instabiel? Verklaar.

____

____

____

6 ^{12}C (koolstof-12) en ^{56}Fe (ijzer-56) zijn twee stabiele nucliden. ^{12}C heeft 6 protonen en 6 neutronen. ^{56}Fe heeft 26 protonen en 30 neutronen. Waarom heeft stabiel ijzer meer neutronen dan protonen en stabiele koolstof niet?

7 De enige stabiele kernen met meer protonen dan neutronen zijn ^1_1H en ^3_2He.
Waarom is $Z > N$ zo zeldzaam?

8 Waarom valt een loodkern met 82 protonen niet uit elkaar?

- ☐ De positief geladen protonen en de negatief geladen neutronen houden elkaar in evenwicht.
- ☐ De positief geladen protonen en de negatief geladen atomaire elektronen houden elkaar in evenwicht.
- ☐ Protonen hebben geen lading binnen een kern.
- ☐ Ladingen voelen geen elektrische kracht binnen een kern.
- ☐ De gravitatiekracht houdt de protonen en neutronen bijeen.
- ☐ De sterke kernkracht houdt de protonen en neutronen bijeen.

9 Vul de uitspraken aan met 'altijd', 'soms' of 'nooit'.

a Kernen met een verschillend protonental Z hebben ________ een verschillend nucleonental A.

b Het protonental Z is ________ gelijk aan het aantal atomaire elektronen van een neutraal atoom.

c De sterke kernkracht tussen twee protonen is ________ sterker dan de elektrische kracht tussen twee protonen.

d Radionucliden ontstaan ________ als gevolg van menselijke activiteiten.

10 Bestudeer een stukje van de nuclidenkaart op de afbeelding.

a Noteer de stabiele isotopen van:

1 xenon: ______________________

2 jood: ______________________

b Geef een voorbeeld van:

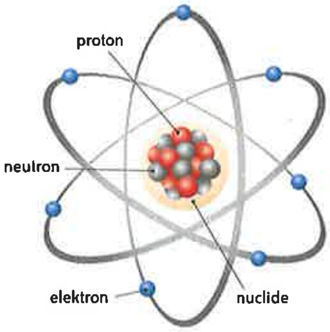
1 een stabiele isotoop: ______________

2 een nuclide die radioactief vervalt door een proton om te zetten in een neutron: ______________

3 een nuclide die radioactief vervalt door een neutron om te zetten in een proton: ______________

^{125}Cs	^{126}Cs	^{127}Cs	^{128}Cs	^{129}Cs	^{130}Cs	^{131}Cs	^{132}Cs	^{133}Cs	^{134}Cs
^{124}Xe	^{125}Xe	^{126}Xe	^{127}Xe	^{128}Xe	^{129}Xe	^{130}Xe	^{131}Xe	^{132}Xe	^{133}Xe
^{123}I	^{124}I	^{125}I	^{126}I	^{127}I	^{128}I	^{129}I	^{130}I	^{131}I	^{132}I
^{122}Te	^{123}Te	^{124}Te	^{125}Te	^{126}Te	^{127}Te	^{128}Te	^{129}Te	^{130}Te	^{131}Te
^{121}Sb	^{122}Sb	^{123}Sb	^{124}Sb	^{125}Sb	^{126}Sb	^{127}Sb	^{128}Sb	^{129}Sb	^{130}Sb

11 Wat zijn A, Z en N op de afbeelding?



A: ______________ Z: ______________ N: ______________

12 Bestudeer het radioactief verval van een aantal nucliden.

a $^{34}_{17}Cl$

1 Zoek de nuclide $^{34}_{17}Cl$ op dit stukje van de nuclidenkaart.

^{33}Ar	^{34}Ar	^{35}Ar	^{36}Ar	^{37}Ar
^{32}Cl	^{33}Cl	^{34}Cl	^{35}Cl	^{36}Cl
^{31}S	^{32}S	^{33}S	^{34}S	^{35}S
^{30}P	^{31}P	^{32}P	^{33}P	^{34}P

Hoe vervalt die nuclide?

☐ α-verval ☐ β^--verval ☐ β^+-verval ☐ γ-verval

2 Naar welke nuclide vervalt $^{34}_{17}Cl$? ______________

b $^{242}_{94}\text{Pu}$

1 Zoek de nuclide $^{242}_{94}\text{Pu}$ op dit stukje van de nuclidenkaart.

^{241}Am	^{242}Am	^{243}Am	^{244}Am	^{245}Am
^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu	^{243}Pu	^{244}Pu
^{239}Np	^{240}Np	^{241}Np	^{242}Np	^{243}Np
^{238}U	^{239}U	^{240}U	^{241}U	^{242}U

Hoe vervalt die nuclide?

☐ α-verval ☐ β^--verval ☐ β^+-verval ☐ γ-verval

2 Naar welke nuclide vervalt $^{242}_{94}\text{Pu}$? ____________________

c $^{69}_{28}\text{Ni}$

1 Zoek de nuclide $^{69}_{28}\text{Ni}$ op dit stukje van de nuclidenkaart.

^{68}Cu	^{69}Cu	^{70}Cu	^{71}Cu	^{72}Cu
^{67}Ni	^{68}Ni	^{69}Ni	^{70}Ni	^{71}Ni
^{66}Co	^{67}Co	^{68}Co	^{69}Co	^{70}Co
^{65}Fe	^{66}Fe	^{67}Fe	^{68}Fe	^{69}Fe

Hoe vervalt die nuclide?

☐ α-verval ☐ β^--verval ☐ β^+-verval ☐ γ-verval

2 Naar welke nuclide vervalt $^{69}_{28}\text{Ni}$? ____________________

13 Wie heeft gelijk?

☐ A ☐ B ☐ C ☐ D

A α-straling is eigenlijk geen straling, want α-straling bestaat uit $^{4}_{2}$He-kernen.

B Straling kun je enkel als elektromagnetische golven voorstellen.

C Elektromagnetische golven kun je ook als deeltjes voorstellen, namelijk als fotonen.

D Alleen de zon zendt straling uit.

Verklaar.

14 Is dit radioactief verval mogelijk? Verklaar telkens waarom wel of niet.

a van $^{235}_{92}U$ naar $^{236}_{93}Np$

☐ verval mogelijk ☐ verval niet mogelijk

b α-verval van $^{3}_{1}H$

☐ verval mogelijk ☐ verval niet mogelijk

c β^--verval van $^{3}_{1}H$

☐ verval mogelijk ☐ verval niet mogelijk

▸ Meer oefenen? Ga naar iDiddit.

HOOFDSTUKSYNTHESE

KERNBEGRIPPEN	NOTITIES
nucleonen	**Protonen en neutronen** worden nucleonen genoemd.
massagetal of nucleonental A	Het massagetal of nucleonental A is het **aantal nucleonen in een nuclide**.
protonental Z	Het protonental Z geeft het **aantal protonen in een nuclide** weer.
neutronental N	Het neutronental N is het **aantal neutronen in een nuclide**: $N = A - Z$.
nuclide of kern	Een nuclide of kern bevat A **nucleonen**, waarvan Z **protonen** en N **neutronen**. Een nuclide van het chemische element X noteer je als $^{A}_{Z}X$ of ^{A}X.
isotope nucliden of **isotopen**	Nucliden met een **hetzelfde protonental** Z, maar een **verschillend nucleonental** A noem je **isotope nucliden** of **isotopen**.
stabiele nucliden	Stabiele nucliden **wijzigen Z of N niet spontaan.**
instabiele nucliden of **radionucliden**	Instabiele nucliden of radionucliden **wijzigen Z en/of N om hun energie te verlagen.**
sterke kernkracht	**Nucleonen interageren** met elkaar via de sterke kernkracht. Die is sterk aantrekkend tussen nucleonen in een kern.
natuurlijke radionucliden	Natuurlijke radionucliden **komen in de natuur voor.**
kunstmatige radionucliden	Kunstmatige radionucliden worden **door de mens gemaakt.**
nuclidenkaart	De nuclidenkaart is **een grafiek met op de horizontale as N en op de verticale as Z.** De nuclidenkaart bevat alle stabiele en instabiele nucliden.
atomaire massa-eenheid u	$1\ \text{u} = \dfrac{\text{massa van een } ^{12}_{6}\text{C-atoom}}{12}$ $1\ \text{u} = 1{,}660\ 54 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$
mega-elektronvolt	$1\ \text{MeV} = 1{,}602\ 176\ 5 \cdot 10^{-13}\ \text{J}$
massa-energierelatie van Einstein	$E_0 = m \cdot c^2$, met E_0 de rustenergie, m de massa en c de lichtsnelheid
rustenergie van een kern	De minimale energie die een kern kan hebben

HOOFDSTUKSYNTHESE

kennisclip

KERNBEGRIPPEN	NOTITIES
specifieke rustenergie	De rustenergie per nucleon $\frac{E_0}{A}$
α-straling	Straling die uit ${}^{4}_{2}He$-kernen bestaat. Vooral zware kernen vervallen via α-straling.
β^--straling	Straling die uit elektronen bestaat. Kernen met een teveel aan neutronen vervallen meestal via β^--straling. Ze zetten daarbij een neutron om in een proton.
positronen	Positronen zijn deeltjes die erg op elektronen lijken, maar een tegengestelde (en dus positieve) lading hebben.
β^+-straling	Straling die uit positronen bestaat. Kernen met een teveel aan protonen vervallen meestal via β^+-straling. Ze zetten daarbij een proton om in een neutron.
γ-straling	Hoogenergetische elektromagnetische straling. Kernen met een energie hoger dan hun rustenergie vervallen via γ-straling. Het protonental Z en het neutronental N blijven ongewijzigd.

Radioactiviteit in het dagelijkse leven

LEERDOELEN

- Verklaren waarom er bij de fusie van lichte kernen en de splitsing van zware kernen enorme hoeveelheden energie vrijkomen
- De werking van een kernsplitsingsreactor en de voor- en nadelen ervan beschrijven
- Het begrip 'ioniserende straling' beschrijven
- Beschermingsmaatregelen tegen ioniserende straling omschrijven
- De grootheid sievert interpreteren
- De meest voorkomende bronnen van ioniserende straling benoemen en beschrijven

Radioactiviteit is niet meer weg te denken uit ons dagelijks leven. Een groot deel van onze elektriciteit wordt geproduceerd in kerncentrales. Ook in de medische wereld wordt gebruikgemaakt van straling afkomstig van radioactieve kernen. Dat is het geval bij medische beeldvorming of om kanker te behandelen.

Hoe kan kernenergie gebruikt worden om elektriciteit op te wekken? En hoe schadelijk is de radioactiviteit in onze omgeving? Je leert er meer over in dit hoofdstuk.

1 Kerncentrales

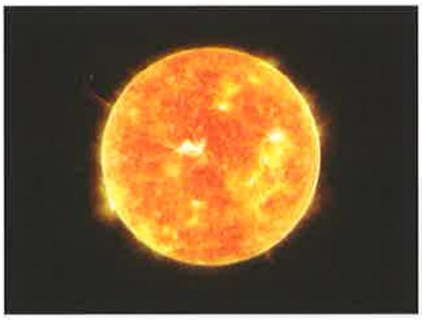
1.1 Energie uit lichte en zware kernen

Afb. 25

In kerncentrales gebruikt men kernenergie om elektriciteit op te wekken.

Afb. 26

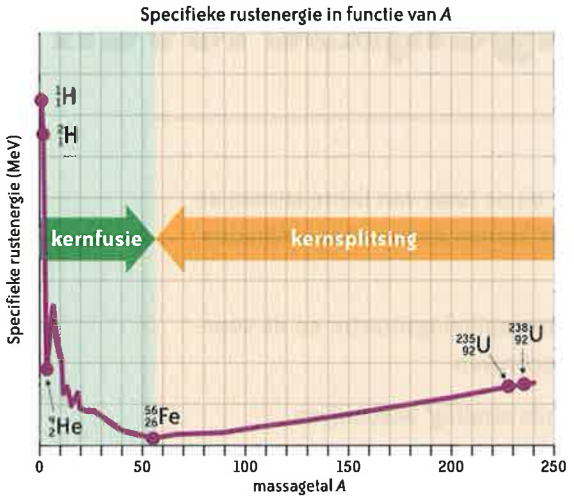
Kernenergie wordt (jammer genoeg) ook gebruikt in atoombommen.



Afb. 27

De zon geeft licht en warmte dankzij vrijgekomen kernenergie.

De paarse curve op grafiek 3 toont de specifieke rustenergie van een aantal stabiele kernen en natuurlijke radionucliden als functie van het massagetal A.



◀ Grafiek 3
De rustenergie als functie van het massagetal A voor een aantal stabiele nucliden en natuurlijke radionucliden

Door de grafiek te bestuderen, leer je het volgende:

- De **lichtste kernen** hebben een **hoge specifieke rustenergie**.
- De specifieke rustenergie daalt naarmate A toeneemt, en bereikt een breed **minimum** bij de **middelzware kernen** (met A tussen $A \approx 40$ en $A \approx 80$). Voor middelzware nucliden zijn de **nucleonen sterk aan de kern gebonden**.
- **^{56}Fe** heeft de laagste specifieke rustenergie en is bijgevolg de **stabielste kern**. Het gevolg is dat ^{56}Fe erg veel voorkomt in het heelal.
- Na het brede minimum, vanaf $A \approx 80$, neemt de specifieke rustenergie langzaam toe. Dat betekent dat de **nucleonen in zwaardere kernen iets minder sterk aan de kern gebonden** zijn. Anders gezegd: het is iets gemakkelijker om nucleonen los te maken uit een zwaardere kern.

Afhankelijk van hun massagetal A kunnen er op twee verschillende manieren grote hoeveelheden energie worden vrijgemaakt uit kernen (grafiek 3):

- **Zware nucliden** kunnen **uiteenvallen in twee middelzware nucliden**. Dat noem je **kernsplitsing** of **kernfissie**.
- **Lichte nucliden** kunnen **samen** een **zwaardere nuclide** vormen. Dat noem je **kernfusie**.

Zowel bij kernsplitsing als bij kernfusie **daalt de specifieke rustenergie** van de kernen. Die vrijgekomen energie kan worden omgezet naar andere energiebronnen. Kernsplitsing wordt in kerncentrales gebruikt om elektriciteit op te wekken.

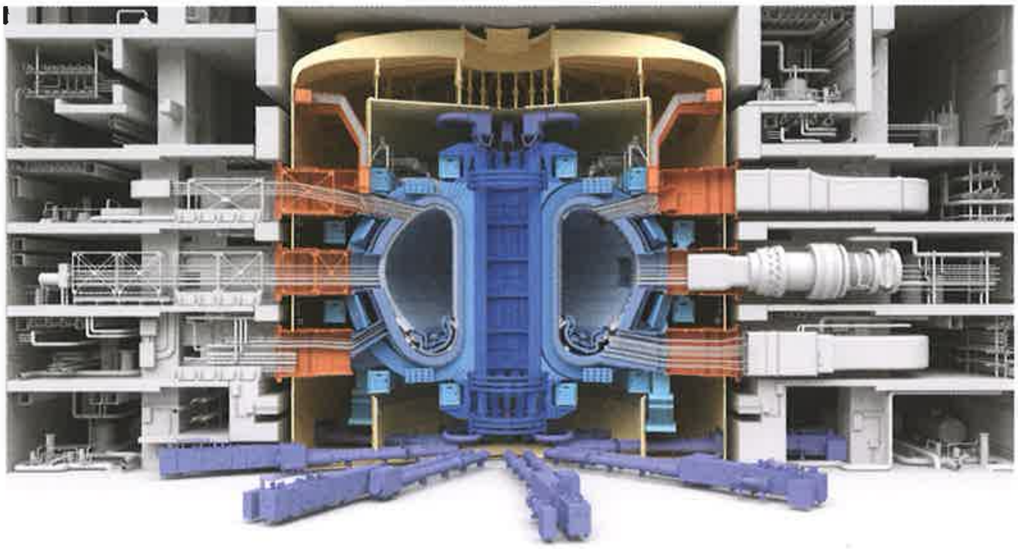
Op aarde is kernfusie moeilijk te realiseren omdat lichte kernen de elektrische kracht moeten overwinnen om samen een nieuwe kern te vormen. De zon haalt haar energie wel uit de fusie van lichte kernen. Kernfusie in de zon is mogelijk door de hoge temperaturen in de zon.

Er kunnen grote hoeveelheden kernenergie vrijkomen door:

- **kernsplitsing:** kernen die uiteenvallen;
- **kernfusie:** kernen die worden samengevoegd.

video:
energie uit
kernfusie

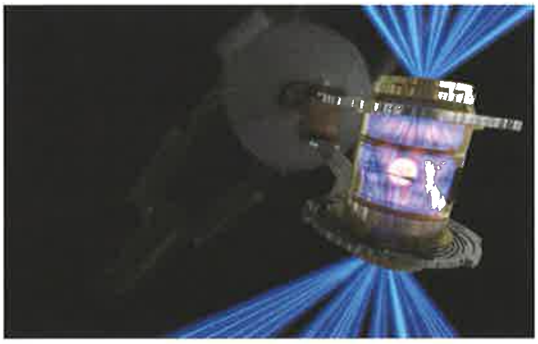
WEETJE



Afb. 28
De fusiereactor van ITER in Frankrijk

Twee belangrijke onderzoekscentra voor kernfusie zijn ITER in Frankrijk en JET in het Verenigd Koninkrijk. In die centrales wordt het plasma bijeengehouden in een torus (donutvorm). De neutronen die tijdens de fusiereactie ontstaan, zijn elektrisch neutraal en kunnen de torus verlaten. Ze produceren warmte door tegen de wand te botsen. Net zoals in een splitsingscentrale, is het de bedoeling om de gecreëerde warmte te gebruiken om water om te zetten in stoom. De stoom zet op zijn beurt een turbine en een elektrische generator in beweging.

JET is de eerste reactor waarin wetenschappers fusie op aarde hebben uitgevoerd. Daarbij werd er meer energie verbruikt dan er geproduceerd werd. ITER is momenteel in opbouw. Volgens de huidige planning wordt ITER in 2025 operationeel. Het is de bedoeling dat ITER tien keer meer energie zal produceren dan verbruiken, maar het zal nog vele jaren duren voordat het zover is.



Afb. 29
In *Lawrence Livermore National Laboratory* konden wetenschappers netto-energie halen uit kernfusie.

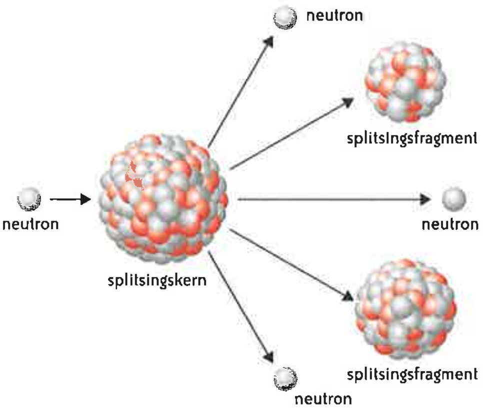
In 2022 slaagden Amerikaanse wetenschappers er voor het eerst in om netto-energie uit kernfusie te halen. Ze hanteerden een ander principe dan de onderzoekers in JET of ITER. Ze stuurden intens laserlicht van 192 lasers op een piepkleine capsule met deuterium en tritium. Daarbij ontstonden er zulke hoge temperaturen dat de deuterium- en tritiumkernen samensmolten tot helium. Omdat de fusie enkel plaatsvond in een piepkleine capsule, kunnen we het principe jammer genoeg niet gebruiken voor commerciële fusiereactoren.

1.2 Spontane en niet-spontane splitsing

Spontane splitsing komt bijna uitsluitend voor bij **extreem instabiele kunstmatige radionucliden** met een erg hoog massagetal.
Op de nuclidenkaart op p. 125 staan de spontane splitsingskernen afgebeeld in het groen.

Kernen kunnen echter ook **splitsen** doordat er een **neutron invalt op een zware kern**. In principe kan elke zware kern splitsen, maar in de praktijk is de splitsingswaarschijnlijkheid enkel bij ^{235}U (uranium- 235), ^{239}Pu (plutonium-239) en ^{233}U (uranium-233) groot genoeg om praktisch nut te kunnen hebben.

- Van die drie nucliden is enkel ^{235}U een natuurlijke radionuclide.
- ^{239}Pu en ^{233}U moeten in laboratoria worden gemaakt.



▲ Afb. 30
Kernsplitsing als gevolg van een invallend neutron

Daarom gebruikt men bij toepassingen van kernsplitsing meestal ^{235}**U**.

In natuurlijk uranium komt maar 0,7 % ^{235}U voor. Daarom verhoogt men voor praktische doeleinden het percentage ^{235}U in natuurlijk uranium in een laboratorium tot 2 à 4 %. Dat proces noem je het **verrijken** van uranium.

- Meestal **komt het kernsplitsingsproces op gang** doordat er een **neutron op een zware kern invalt**. Spontane splitsing komt zelden voor.
- Voor toepassingen van **kernsplitsing** gebruikt men gewoonlijk ^{235}**U**, omdat dat de enige natuurlijke radionuclide met een voldoende grote splitsingswaarschijnlijkheid is.
- Natuurlijk uranium bevat maar heel weinig ^{235}U, namelijk 0,7 %. Daarom verhoogt men in laboratoria het percentage ^{235}U in uranium (tot 2 à 4 %). Dat noem je het **verrijken** van uranium.

1.3 De splitsing van ^{235}U

Het splitsingsproces wordt op gang gebracht door ^{235}U te beschieten met neutronen. Dan zijn er verschillende splitsingsreacties mogelijk. Daarbij verschillen de gevormde kernen en het aantal vrijgekomen neutronen:

Bijvoorbeeld: $^{235}_{92}U + n^0 \rightarrow {}^{144}_{56}Ba + {}^{89}_{36}Kr + 3 \cdot n^0$

Of: $^{235}_{92}U + n^0 \rightarrow {}^{139}_{53}I + {}^{95}_{39}Y + 2 \cdot n^0$ enzovoort

Voor alle kernsplitsingsreacties geldt dat het aantal protonen en het aantal neutronen voor en na de splitsing gelijk blijft.

Omdat zware kernen in verhouding meer neutronen bevatten dan middelzware kernen, hebben de **splitsingsfragmenten**, zoals $^{144}_{56}Ba$, $^{89}_{36}Kr$, $^{139}_{53}I$ en $^{95}_{39}Y$, een **overschot aan neutronen**. Ze zijn met andere woorden **instabiel** en zullen **radioactief vervallen** door een neutron om te zetten in een proton, dus via β^--verval.

Die splitsingsfragmenten zijn dan ook een belangrijke bron van **radioactief afval**. In tegenstelling tot andere vormen van vervuiling, is dat afval wel gemakkelijk op te vangen. Het komt dus niet zomaar in de natuur of in de nabijheid van mensen terecht. Een **veilige berging** van het nucleaire afval is belangrijk. Kortlevend radioactief afval moet tot driehonderd jaar worden opgeslagen vooraleer het niet meer radioactief is. Een kleine fractie van het afval is hoogradioactief moet gedurende duizenden jaren veilig worden opgeslagen.

- Wanneer een neutron botst met een ^{235}U-kern, valt de ^{235}U-kern uit elkaar in twee middelzware kernen en een paar neutronen. Er zijn verschillende combinaties van middelzware kernen en een aantal neutronen mogelijk.
- De **splitsingsfragmenten** hebben een teveel aan neutronen. Ze zijn daarom **radioactief** en vormen een belangrijke bron van **radioactief afval**. Een veilige berging van het radioactieve afval is belangrijk.

WEETJE

In België is NIRAS, de Nationale Instelling voor Radioactief Afval en verrijkte Splijtstoffen, verantwoordelijk voor het beheer van het radioactieve afval. In afwachting van definitieve berging wordt het nucleaire afval momenteel opgeslagen op een select aantal zeer streng bewaakte locaties: het terrein van Belgoprocess in Dessel en de kerncentrales in Doel en Tihange.

▲ Afb. 31
Vaten met radioactief afval wachtend op verwerking in de opslagruimte van Belgoprocess in Dessel

1.4 Kettingreacties

Om de enorme bron van splitsingsenergie aan te boren, is het belangrijk dat de kernsplitsing niet stopt na de splitsing van één ^{235}U-kern. Bij de splitsing van een ^{235}U-kern komen er gewoonlijk 2 of 3 neutronen vrij. De wetenschapper Fermi was een van de eersten die besefte dat je die **vrijgekomen neutronen** kunt gebruiken om **nieuwe ^{235}U-kernen te splitsen**.

WEETJE

▲ Afb. 32
Enrico Fermi

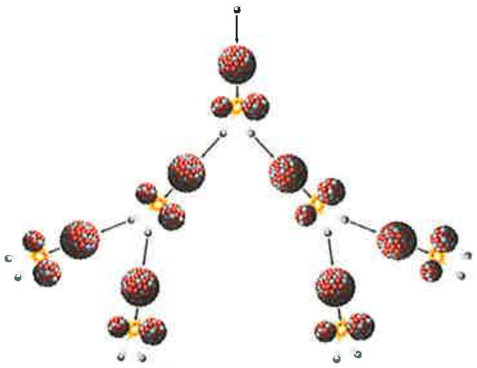
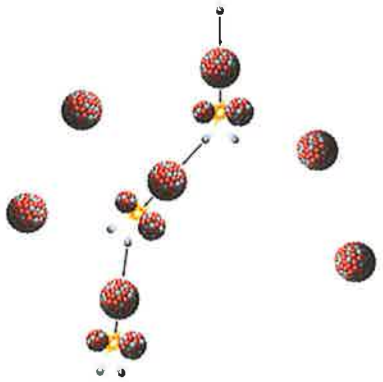
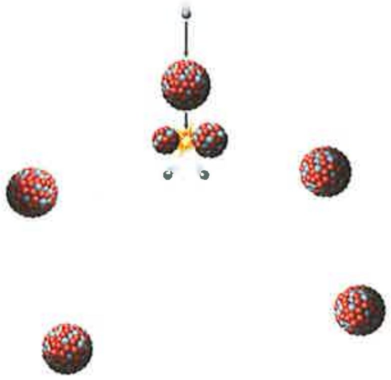
Enrico Fermi won in 1938 de Nobelprijs voor 'het aantonen van nieuwe radioactieve elementen door bestraling met neutronen, en daarmee samenhangend de ontdekking van kernreacties veroorzaakt door langzame neutronen'. Hij introduceerde als eerste de zwakke kernkracht en speelde een pioniersrol in de ontwikkeling van kernreactoren. Hij was ook betrokken bij de uitvinding van de atoombom.

De 2 of 3 neutronen die bij de splitsing van een ^{235}U-kern vrijkomen, kunnen op hun beurt invallen op nieuwe ^{235}U-kernen en nieuwe kernsplitsingen veroorzaken. Daarbij komen er opnieuw neutronen vrij, die opnieuw kernsplitsingen veroorzaken. Zo ontstaat er een **kettingreactie**, die schematisch wordt weergegeven op afbeeldingen 33, 34 en 35.

Een kettingreactie is een serie gebeurtenissen waarbij elke gebeurtenis wordt veroorzaakt door een vorige.

Voor een zichzelf onderhoudende kettingreactie moet minstens een van de geproduceerde neutronen een nieuwe ^{235}U-kern doen splitsen. Het verloop van de kettingreactie wordt dan ook bepaald door de **vermenigvuldigingsfactor *f***: het gemiddelde aantal neutronen per splitsing dat een nieuwe splitsing veroorzaakt.

Het begrip 'vermenigvuldingsfactor' wordt ook in andere contexten gebruikt. Zo gebruikten wetenschappers tijdens de coronapandemie het woord 'reproductiegetal' om uit te drukken of de pandemie toenam of afnam. De vermenigvuldigingsfactor en het reproductiegetal zijn synoniemen.

TYPE KETTINGREACTIE	SCHEMATISCHE VOORSTELLING
gevaarlijk explosieve kettingreactie Als $f > 1$, dan neemt het aantal splitsingen exponentieel toe. Het resultaat is een ongecontroleerde, gevaarlijke, explosieve kettingreactie. Op dat principe zijn atoombommen gebaseerd. ▸ Afb. 33 Een kettingreactie met vermenigvuldigingsfactor $f = 2$ is gevaarlijk explosief.	
veilige, gecontroleerde kettingreactie Als $f = 1$, dan zorgt 1 neutron geproduceerd in de splitsing van één ^{235}U-kern voor de splitsing van één nieuwe ^{235}U-kern. De kettingreactie onderhoudt zichzelf zonder explosief te worden. ▸ Afb. 34 Een kettingreactie met vermenigvuldigingsfactor $f = 1$ onderhoudt zichzelf zonder explosief te worden.	
stilvallende kettingreactie Als $f < 1$, dan neemt het aantal splitsingen voortdurend af en dooft de kernreactie uit. ▸ Afb. 35 Een kettingreactie met vermenigvuldigingsfactor $f < 1$ valt stil.	

Gebruik de applet 'Kernsplitsing' om de kettingreacties te simuleren. Kies voor 'Chain Reaction'.

De neutronen die vrijkomen bij de splitsing van een ^{235}U-kern, kunnen een nieuwe ^{235}U-kern doen splitsen. Het gemiddelde aantal neutronen per splitsing dat een nieuwe splitsing veroorzaakt, noem je de **vermenigvuldigingsfactor *f*.**

- Als $f > 1$, dan ontstaat er een explosieve kettingreactie. Op dat principe zijn atoombommen gebaseerd.
- Als $f = 1$, dan onderhoudt de kernreactie zichzelf zonder explosief te worden.
- Als $f < 1$, dan dooft de kernreactie uit.

1.5 Kernsplitsingsreactoren

Een **kerncentrale** haalt haar energie uit een gecontroleerde kettingreactie van kernsplitsingen en zet die om in elektrische energie. De splitsingsreacties gebeuren in de **kernreactor** van de centrale. Voor een goede, gecontroleerde werking van een kernreactor is het essentieel dat men de vermenigvuldigingsfactor gelijk aan (of net iets kleiner dan) 1 houdt: $f = 1$. De kernreactor bevat daarom een **moderator** en **controlestaven**.

▲ Afb. 36
Water in een kernreactor. De blauwe gloed noem je cherenkovstraling. Die straling ontstaat doordat geladen deeltjes, bijvoorbeeld hoogenergetische elektronen, sneller dan het licht door water bewegen. Dat is mogelijk doordat water het licht vertraagt. De geladen deeltjes komen vrij na radioactief verval van de splitsingsfragmenten.

▲ Afb. 37
De controlestaven van een kernreactor

Bekijk de video over de werking van een kerncentrale.

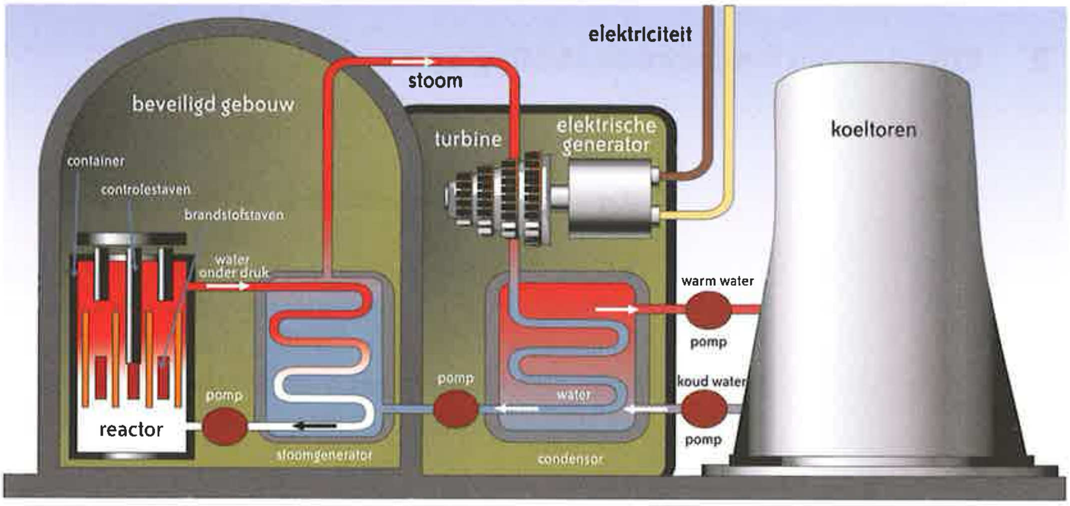
1. De **moderator verhoogt de vermenigvuldigingsfactor** f door ervoor te zorgen dat de neutronen voldoende vertraagd worden. Vertraagde neutronen worden gemakkelijker opgenomen door een ^{235}U-kern. Je kunt het vergelijken met een keeper die een voetbal moet pakken: dat is gemakkelijker bij een traag rollende bal dan bij een bal met een hoge snelheid. Een stof met lichte atomen is het meest geschikt als moderator.

   In de huidige commerciële reactoren, zoals in Doel of Tihange, gebruikt men vaak water als moderator. De kernreactor van Tsjernobyl bevatte grafiet als moderator. Water is veel veiliger als moderator dan grafiet. Bij explosieve reacties wordt er veel warmte ontwikkeld, die ervoor zorgt dat het water verdampt en de kettingreactie stilvalt. Warm grafiet daarentegen zal de neutronen nog meer vertragen en de vermenigvuldigingsfactor doen toenemen.

2. De **controlestaven verlagen de vermenigvuldigingsfactor** f door neutronen te absorberen. Ze bestaan uit cadmium of boor, atoomsoorten waarvan de kernen gemakkelijk neutronen vangen. Door de controlestaven in en uit de reactor te schuiven, kunnen de operatoren de vermenigvuldigingsfactor f indien gewenst laten afnemen of toenemen.

Afbeelding 38 toont schematisch de werking van een volledige kerncentrale voor de productie van elektriciteit. In de **kernreactor** vinden de **splitsingsreacties** plaats. De brandstofstaven bevatten **^{235}U**. Het **water** in de container is de **moderator** en wordt **opgewarmd** door de vrijgekomen splitsingsenergie. Het warme water geeft zijn warmte via een warmtewisselaar af aan een **stoomgenerator**. De stoom laat de **turbine draaien** en de turbine laat op haar beurt de **elektrische generator** (een soort grote fietsdynamo) **draaien**. De stoom wordt door een derde watercircuit afgekoeld, condenseert in een condensor opnieuw tot water en wordt via een pomp weer naar de stoomgenerator gebracht. De restwarmte wordt via het derde watercircuit afgeleid naar de koeltorens, waar het water zijn warmte afgeeft aan de atmosfeer en in een rivier geloosd wordt. De elektrische generator is verbonden met het stroomnet.

Het grote **voordeel** van kerncentrales is dat ze, in tegenstelling tot gas- of steenkoolcentrales, **geen CO_2** uitstoten. Ze zijn ook erg energie-efficient: de energieopbrengst per kg splijtstof is groot. Als gevolg van de strijd tegen de klimaatopwarming is er daarom opnieuw meer interesse om bestaande kerncentrales te behouden of nieuwe te bouwen. Een **nadeel** is de productie van **radioactief afval**.



Afb. 38
Schematische voorstelling van de werking van een kerncentrale

Kernreactoren functioneren bij $f = 1$. Daarom bevatten ze een moderator en controlestaven.

- De **moderator verhoogt de vermenigvuldigingsfactor** door de neutronen te vertragen.
  Tragere neutronen worden gemakkelijker opgenomen door de ^{235}U-kernen.
- **Controlestaven verlagen de vermenigvuldigingsfactor.** Ze bestaan uit atomen waarvan de kernen gemakkelijk neutronen absorberen. Door de controlestaven in en uit de reactor te schuiven, kunnen operatoren de vermenigvuldigingsfactor aanpassen.

Er zijn voor- en nadelen aan kernreactoren:

- Voordeel: ze stoten **geen CO_2** uit en zijn **energie-efficiënt**.
- Nadeel: ze produceren **radioactief afval**.

WEETJE

Het onderzoek naar kernsplitsing kende vooral tijdens de Tweede Wereldoorlog een snelle evolutie vanwege het militaire belang ervan. Op 6 augustus 1945 viel er een atoombom met uranium op de Japanse stad Hiroshima en op 9 augustus een tweede bom met plutonium op Nagasaki. Bij de ontploffing van de bommen ontstond er een explosieve kettingreactie van kernsplitsingen ($f > 1$). De gevolgen waren verwoestend:

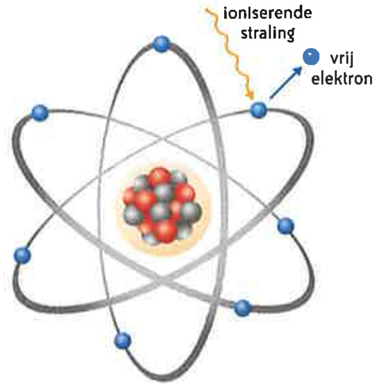
Afb. 39
Foto van Hiroshima enkele dagen nadat de stad werd getroffen door een atoombom. Alleen het geraamte van het Museum voor Wetenschappen en Industrie bleef overeind. Alle andere gebouwen in de omgeving werden van de kaart geveegd.

- Veel energie kwam vrij in de vorm van warmte. Dat veroorzaakte branden tot op 1 km van het trefpunt en brandwonden tot op 3,5 km van het trefpunt.
- De ontploffing ging gepaard met een enorme drukgolf. In Hiroshima werden woningen in een straal van 2 km met de grond gelijkgemaakt en in een straal van 6 km zwaar beschadigd.
- Veel hoogradioactieve splitsingsfragmenten kwamen in de atmosfeer terecht en werden verder door winden over het aardoppervlak verspreid. Door de regen kwamen de splitsingsresten in planten en dus in het plantaardige voedsel terecht. Op die manier belandden ze in het menselijk lichaam, waar ze schade konden berokkenen.

2 Effecten van ioniserende straling op de mens

2.1 Ioniserende straling

Straling die over voldoende energie beschikt om atomen en moleculen te kunnen ioniseren, noem je **ioniserende straling**. Voorbeelden van ioniserende straling zijn uv-straling, snelle neutronen die vrijkomen bij fusie- of splitsingsreacties, α-straling, β-straling en γ-straling. Alle straling die vrijkomt bij radioactief verval, is ioniserende straling.



▲ Afb. 40
Ioniserende straling

Als er ioniserende straling op het menselijk lichaam invalt, dan kan die straling moleculen in het lichaam ioniseren. Meestal is het geen probleem als er een molecule in ons lichaam verloren gaat. Van de meeste moleculen zijn er voldoende kopieën ons lichaam aanwezig of kunnen er kopieën worden bijgemaakt.

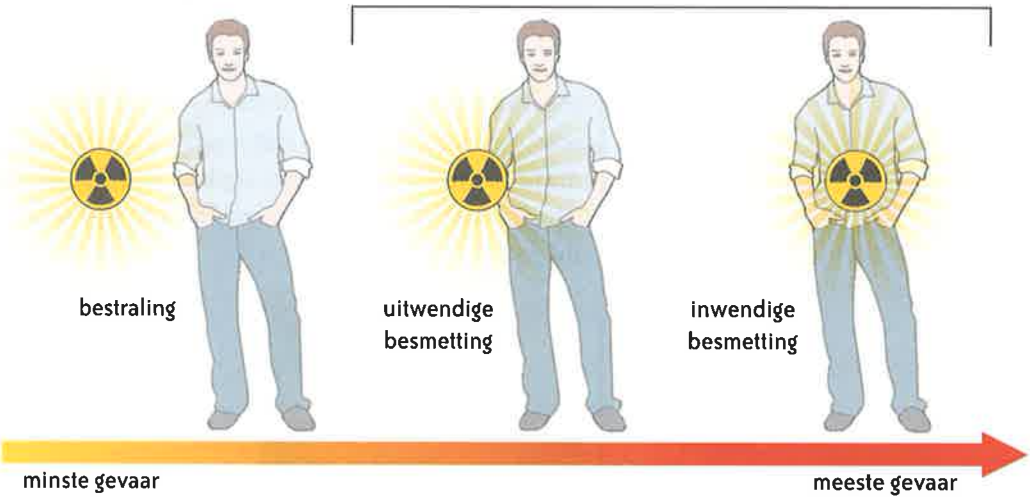
Als ons lichaam echter gewijzigde kopieën van de kapotte moleculen aanmaakt, kan er kanker ontstaan. Ook als er te veel moleculen beschadigd raken, is dat schadelijk voor ons lichaam.

Blootstelling aan straling, bijvoorbeeld bij medische toepassingen, moet dus altijd worden afgewogen tegen de eventuele voordelen ervan. Voor werknemers die beroepshalve vaak met radioactiviteit in contact komen, zijn er strenge veiligheidsmaatregelen uitgewerkt om de opgelopen stralingsdosis zo laag mogelijk te houden.

Ioniserende straling is straling die over voldoende energie beschikt om atomen en moleculen te **ioniseren**. Blootstelling aan ioniserende straling kan lichaamsschade veroorzaken.
Het lichaam beschikt over beschermingsmechanismen om schade door ioniserende straling te herstellen, maar soms kan er kanker ontstaan.

2.2 Voorzorgsmaatregelen tegen besmetting en bestraling

Je kunt op verschillende manieren in contact komen met ioniserende straling. Het soort contact bepaalt de graad van gevaar.



▲ Afb. 41
Het verschil tussen besmetting en bestraling

Ioniserende straling is het gevaarlijkst als je in rechtstreeks contact komt met de radionucliden van de stralingsbron.

Rechtstreeks contact met radionucliden wordt **besmetting** genoemd.
Er zijn twee mogelijkheden:

- Bij **inwendige besmetting** zitten de **radionucliden binnen in je lichaam.** De meeste besmettingen gebeuren via het eten van voedsel. Ook de lucht bevat radionucliden die je kunt inademen.
- Bij **uitwendige besmetting** zijn de **radionucliden** aanwezig **op je huid, haar of kleding.** Dat kan het gevolg zijn van radionucliden in de lucht of het komt doordat je rechtstreeks een radioactieve bron hebt aangeraakt.

Je hebt **onrechtstreeks contact** met radionucliden als je bestraald wordt door een **stralingsbron op afstand**. Dat noem je **bestraling**. Ook dan kun je lichaamsschade oplopen.

Om de stralingsschade te beperken, kun je voorzorgsmaatregelen nemen. Bij **besmetting** moet je de stralingsbron verwijderen om verdere lichaamsschade te voorkomen.

- Inwendige besmettingsbronnen kun je niet zomaar verwijderen. Het is dus belangrijk om **niet inwendig** met radionucliden **besmet** te worden.
- **Uitwendige besmettingsbronnen** kun je **verwijderen** door uitgebreid te **douchen** en zo de radionucliden op je huid en haar te verwijderen, en door andere kleren aan te trekken.

Wie beroepsmatig in aanraking komt met radioactieve bronnen, vermijdt rechtstreeks contact met de bronnen door **beschermende kleding** te dragen: overalls, handschoenen, schoenbeschermers, gezichtsmaskers enzovoort. Het is ook belangrijk om na het contact met een radioactieve bron altijd goed je **handen te wassen**.

VOORBEELD BESMETTING DOOR BANANEN

Wie lust er niet af en toe eens een banaan? Bananen zijn gezond. Nochtans bevatten bananen en ook ander fruit kalium. Een van de isotopen van kalium is de natuurlijke radionuclide ^{40}K (kalium-40), met een natuurlijk voorkomen van 0,0117 %. ^{40}K is een natuurlijke β^--straler. Door bananen te eten, besmet je jezelf dus met radionucliden. Gelukkig is de stralingsdosis die je op die manier oploopt, erg laag en ongevaarlijk. Je lichaam heeft sowieso kalium nodig om je bloeddruk te regelen en zenuwprikkels over te dragen.

Afb. 42
Bananen: een stralingsbron

Bij **bestraling** kun je de lichaamsschade beperken door:

- de blootstellings**duur** te **beperken**;
- voldoende **afstand** te nemen van de bron;
- jezelf **af** te **schermen** van de bron door bijvoorbeeld loodglas of beschermende kleding te gebruiken.

Afb. 43
Een beschermende loodschort

Bij **besmetting** is er **rechtstreeks contact** met radionucliden:

- bij **inwendige besmetting** in je lichaam;
- bij **uitwendige besmetting** op je haar, huid of kleren.

Uitwendige besmetting kun je verwijderen, inwendige besmetting niet.

Bij **bestraling** word je wel bestraald door ioniserende straling, maar is er **geen rechtstreeks contact** met de stralingsbron. Stralingsschade door bestraling kun je vermijden door de blootstellings**duur** te **beperken**, **afstand** te houden van de bron en/of **afscherming** te voorzien.

2.3 De biologische schade in je lichaam (in sievert)

De stralingsschade die het lichaam oploopt door bestraling of besmetting, hangt af van:

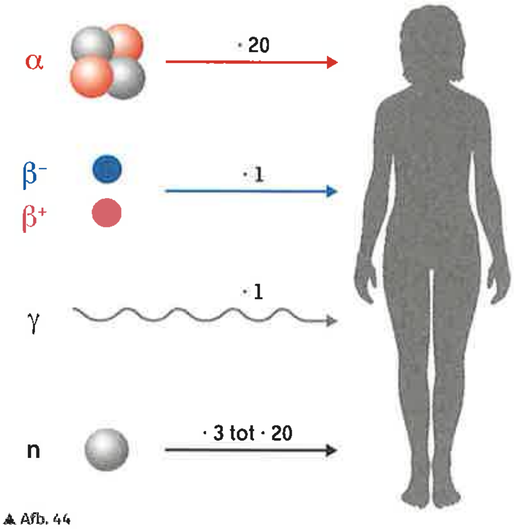
- de hoeveelheid stralingsenergie die het lichaam geabsorbeerd heeft;
- de soort straling die het lichaam geabsorbeerd heeft;
- het weefsel of orgaan dat die straling geabsorbeerd heeft.

De sievert is vernoemd naar de Zweedse medische fysicus Rolf Maximilian Sievert (1896-1966).

Hij bestudeerde de biologische effecten van ioniserende straling.

De grootheid die uitdrukt hoeveel potentiële stralingsschade je lichaam opgelopen heeft, is de **effectieve dosis**. De eenheid is de **sievert**.

α-straling is tot twintig keer schadelijker dan β- of γ-straling. Dat verschil wordt vooral veroorzaakt door het feit dat α-deeltjes zware stralingsdeeltjes zijn en door hun massa veel trager bewegen dan β- of γ-deeltjes met dezelfde energie. Daardoor veroorzaakt α-straling veel ionisaties dicht bij elkaar, wat het risico op onherstelbare schade op een bepaalde plek in het lichaam verhoogt. De kans op blijvende biologische schade is kleiner als de geïoniseerde moleculen meer verspreid in het lichaam liggen, zoals bij β- of γ-straling. Ook neutronen veroorzaken, afhankelijk van hun snelheid, meer lichaamsschade dan β^-- of γ-straling, van drie keer schadelijker voor trage neutronen tot twintig keer schadelijker voor snelle neutronen.

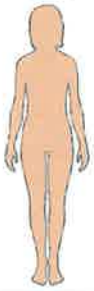


▲ Afb. 44
Relatieve stralingsschade ten gevolge van de verschillende soorten straling

In sommige organen zijn de ionisaties veel schadelijker dan in andere. Dat wordt uitgedrukt door de weefselweegfactor w_w. Hoe groter de weefselweegfactor, hoe gevoeliger het orgaan is voor stralingsschade ten gevolge van blootstelling aan ioniserende straling. Tabellen 1 en 2 lijsten de weefselweegfactoren voor verschillende weefsels en organen op. Als het volledige lichaam gelijkmatig aan de ioniserende straling wordt blootgesteld, is de weefselweegfactor gelijk aan 1.

WEEFSEL OF ORGAAN	w_w	WEEFSEL OF ORGAAN	w_w
voortplantingsorganen	0,20	lever	0,05
rood beenmerg	0,12	slokdarm	0,05
dikke darm	0,12	schildklier	0,05
longen	0,12	huid	0,01
maag	0,12	botoppervlak	0,01
blaas	0,05	rest van het lichaam	0,05
borsten	0,05	**totaal**	**1**

▲ Tabel 1
Relatieve stralingsschade ten gevolge van de verschillende soorten straling

WEEFSELWEEGFACTOR w_W			
voortplantings-organen: 0,20	skelet: • rood beenmerg: 0,12 • botoppervlak: 0,01	blaas: 0,05	borsten: 0,05
			
spijsverteringsstelsel: • dikke darm: 0,12 • maag: 0,12 • lever: 0,05 • slokdarm: 0,05	longen: 0,12	schildklier: 0,05	huid: 0,01

▲ Tabel 2
Weefselweegfactoren voor de verschillende lichaamsdelen

GROOTHEID MET SYMBOOL		EENHEID MET SYMBOOL	
effectieve dosis	H_{eff}	sievert	Sv

De sievert is een grote eenheid. Vaak gebruikt men daarom de mSv (millisievert = 10^{-3} Sv) of µSv (microsievert = 10^{-6} Sv).

De biologische stralingsschade hangt af van:
- de hoeveelheid stralingsenergie die het lichaam geabsorbeerd heeft;
- de soort straling die het lichaam geabsorbeerd heeft;
- het orgaan of het weefsel dat de straling geabsorbeerd heeft.

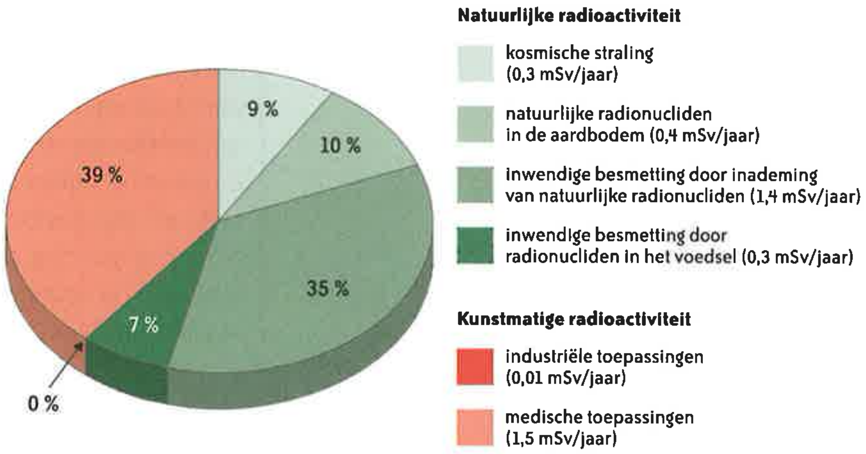
De **effectieve dosis** H_{eff} is een maat voor de mogelijke stralingsschade die het lichaam heeft opgelopen.

De eenheid is de **sievert (Sv)**.

2.4 Gemiddelde jaarlijkse effectieve dosis

Een gemiddelde Belg loopt per jaar een effectieve dosis van 4 mSv op:

- 2,5 mSv is het gevolg van **natuurlijke radioactiviteit**:
  - kosmische straling;
  - aardstraling;
  - inademing van natuurlijke radionucliden;
  - radionucliden in ons voedsel.
- 1,5 mSv is het gevolg van **kunstmatige radioactiviteit**:
  - Die ioniserende straling is bijna uitsluitend afkomstig van **medische toepassingen**.
  - De opgelopen stralingsdosis door industriële toepassingen, bijvoorbeeld de aanwezigheid van kerncentrales, is verwaarloosbaar klein.



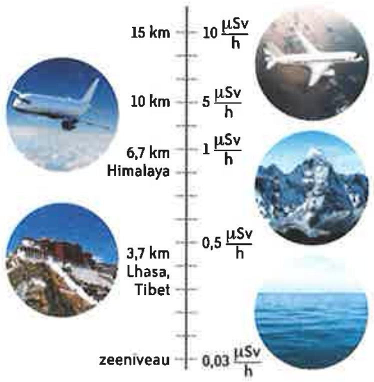
▲ Afb. 45
De geschatte blootstelling aan ioniserende straling voor de gemiddelde Belg, gebaseerd op cijfers van het FANC

Er zijn zes bronnen van ioniserende straling waaraan de gemiddelde Belg wordt blootgesteld. Je bestudeert ze hierna meer in detail.

1 Kosmische straling

Kosmische straling is straling die in het universum ontstaat en voortdurend de aarde bombardeert. Een kleine fractie ervan ontstaat in de zon. Het grootste deel ontstaat in de andere sterren en de rest van het universum.

Als de kosmische straling de atmosfeer bereikt, botst ze met de luchtmoleculen. Dat leidt tot kernreacties waarbij straling vrijkomt, hoofdzakelijk β- en γ-straling. Omdat kosmische straling door de atmosfeer wordt geabsorbeerd, neemt de intensiteit sterk af naarmate je dichter bij het aardoppervlak komt. Ook het aardmagneetveld houdt veel van de geladen deeltjes van de kosmische straling tegen. Een kleine fractie bereikt uiteindelijk toch het aardoppervlak. Hoe hoger je je dus bevindt, aan hoe meer kosmische straling je wordt blootgesteld. Luchtvaartpersoneel dat regelmatig met lange vluchten meevliegt, kan daarom een aanzienlijke dosis straling oplopen.



▲ Afb. 46
Blootstelling aan kosmische straling

2 Natuurlijke radionucliden in de aardbodem

De aarde bevat **van nature** radionucliden die **in de bodem** zitten. Het gaat daarbij vooral om ^{40}K (kalium-40) en radionucliden uit de vervalreeksen van ^{238}U en ^{232}Th.

Omdat bouwmaterialen zoals bakstenen gemaakt worden van bodemmateriaal, bevatten die ook kleine, meestal ongevaarlijke hoeveelheden radionucliden.

VOORBEELD BAKSTENEN

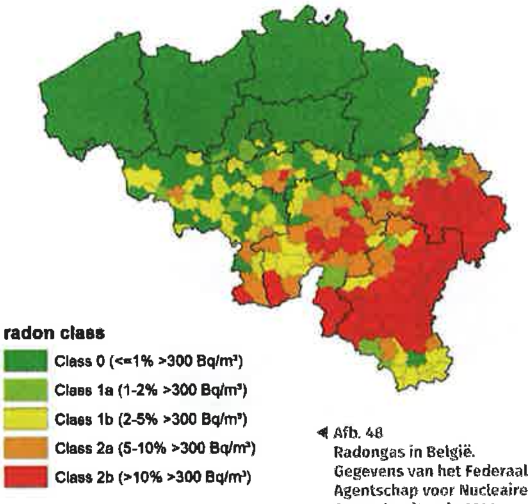
Bakstenen zijn gemaakt van klei uit de bodem en bevatten daardoor kleine hoeveelheden natuurlijke radionucliden (vooral ^{40}K, ^{238}U en ^{232}Th). Wie in een bakstenen huis woont, loopt door de aanwezigheid van radionucliden in de muren een jaarlijkse effectieve dosis van 0,1-0,2 mSv op. De blootstelling aan ioniserende straling moet volgens Europese richtlijnen beperkt worden tot 1 mSv per jaar, bovenop de natuurlijke achtergrondstraling. De hoeveelheid straling die je oploopt door de aanwezigheid van radionucliden in de muren, ligt daar ver onder.

▲ Afb. 47
Bakstenen gemaakt van klei

3 Inademing van natuurlijk radon

Halverwege de uraniumreeks ontstaat het radioactieve ^{222}Rn (radon-222). Omdat dat een edelgas is, zal het vrijkomen uit de bodem en bepaalde bouwmaterialen. Het komt dan in de lucht terecht. Toch is het niet het radongas zelf dat schadelijk is. Bij het verval van ^{222}Rn ontstaan er namelijk nieuwe radionucliden, ook wel radondochters genoemd. Die zijn niet gasvormig en hechten zich vast aan zwevende stofdeeltjes in de lucht. Als je die stofdeeltjes inademt, komen de radondochters in je longen terecht. Bij het verval van de radondochters komt zowel α-, β-, als γ-straling vrij. Door de stralingsschade in de longen kun je longkanker krijgen.

In Vlaanderen zijn de concentraties aan radongas erg laag. In Wallonië zijn er streken met hoge concentraties. In de buitenlucht is het radongas geen probleem, maar in slecht geventileerde huizen kan de concentratie aan radongas oplopen.



◄ Afb. 48
Radongas in België.
Gegevens van het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle, situatie 2023.

4 Natuurlijke radionucliden in voedsel

De natuurlijke radionucliden uit de aardbodem komen ook in ons voedsel terecht. Het gaat in de eerste plaats om ^{40}K.

Zo zijn bananen gekend om hun relatief hoge radioactiviteit. Wanneer je een banaan eet, word je blootgesteld aan een effectieve dosis van ongeveer 0,1 μSv.

▲ Afb. 49
Een banaan heeft een hoge activiteit.

5 Medische toepassingen

In de medische wereld maakt men vaak gebruik van ioniserende straling en radionucliden voor medische beeldvorming of behandeling van kanker. Op iDiddit kun je daar meer over leren.

6 Industriële toepassingen

Straling die afkomstig is van industriële toepassingen, zoals de productie van elektriciteit, draagt nauwelijks bij tot de stralingsdosis waaraan de gemiddelde Belg wordt blootgesteld.

De dosislimieten die je bovenop de natuurlijke achergrondstraling mag oplopen, zijn bij wet vastgelegd en terug te vinden op de website van het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC). De straling die je oploopt bij medische beeldvorming of andere medische behandelingen, is daarin niet inbegrepen.
Wie beroepshalve **niet** met ioniserende straling in contact komt, mag 1 mSv per jaar bovenop de natuurlijke achtergrondstraling oplopen. Daar is de straling die je oploopt bij medische beeldvorming of andere medische behandelingen, **niet** bij inbegrepen.

Meer dan de helft van de ioniserende straling waaraan we blootgesteld worden, is van **natuurlijke oorsprong**: kosmische straling, radionucliden in de aardbodem, ^{222}Rn in de lucht en radionucliden in ons voedsel.

Ook bij **medische toepassingen** worden we aan relatief veel ioniserende straling blootgesteld.

We worden nauwelijks blootgesteld aan ioniserende straling die ontstaat bij industriële toepassingen, zoals kerncentrales.
Wie beroepshalve **niet** in contact komt met ioniserende straling, mag 1 mSv per jaar bovenop de natuurlijke achtergrondstraling oplopen. Daar is de straling die je oploopt bij medische beeldvorming of andere medische behandelingen, **niet** bij inbegrepen.

WEETJE

Bij de kernramp in Tsjernobyl in 1986 werden sommige mensen blootgesteld aan een dosis van 10 Sv. Binnen een maand na de ramp stierven er 31 hulpverleners en technici. 3 mensen kwamen ter plaatse om en 28 mensen stierven in de weken daarna. De inwoners van de vlakbij gelegen stad (Pripjat, 55 000 inwoners tot 1986) en de omliggende dorpen werden pas na 36 uur geëvacueerd en liepen daardoor een gemiddelde dosis van 30 mSv op. De cijfers over hoeveel slachtoffers er de jaren daarna nog gevallen zijn door de gevolgen van de opgelopen straling, lopen sterk uiteen. Dat komt vooral doordat wetenschappers nog niet goed weten welk effect langdurige blootstelling aan lage stralingsdosissen heeft op het menselijk lichaam.

Na het ongeluk in de kerncentrale van Fukushima in 2011 werden de mensen in de omgeving veel sneller geëvacueerd. Daardoor werden ze aan veel minder straling blootgesteld. De gemiddelde dosis waaraan de bevolking in het eerste jaar na de ramp werd blootgesteld, door directe blootstelling aan ioniserende straling of door besmet voedsel te eten, was minder dan 10 mSv. Enkele medewerkers van de kerncentrale werden in het ziekenhuis opgenomen met stralingsziekte nadat ze tot 6 Sv straling hadden opgelopen.

▲ Afb. 50
Afscherming over de kernreactor van Tsjernobyl

AAN DE SLAG

1 Rangschik de nucliden ^{1}H, ^{4}He, ^{56}Fe en ^{238}U volgens stijgende specifieke rustenergie.

____

2 Welke uitspraken zijn correct? Verbeter de foute uitspraken.

a Een $^{1}_{1}H$-kern heeft een hogere rustenergie dan een $^{56}_{26}Fe$-kern.

☐ juist ☐ fout

____

____

____

____

b In een kerncentrale is het belangrijk dat er meer dan 1 neutron dat vrijkomt bij een splitsingsreactie van ^{235}U, een nieuwe splitsingsreactie veroorzaakt. Zo valt de kettingreactie niet stil.

☐ juist ☐ fout

____

____

____

3 Vul de uitspraken aan met 'altijd', 'soms' of 'nooit'.

a Middelzware kernen hebben ______________ een hogere specifieke rustenergie dan zware kernen.

b Als er bij een kernreactie massaverlies is, dan komt er ______________ energie vrij.

c Spontane kernsplitsing komt ______________ voor.

d Neutronen die vrijkomen bij een kernsplitsing, veroorzaken ______________ een nieuwe kernsplitsing.

4 Een neutron valt in op een ^{235}U-kern.
De ^{235}U-kern ondergaat daardoor de volgende splitsingsreactie:

$^{235}_{92}U + n^{0} \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 3 \cdot n^{0}$

Leg uit hoe die splitsingsreactie een kettingreactie kan veroorzaken.

____

____

____

____

5 Vul de uitspraken aan met 'altijd', 'soms' of 'nooit'.

a Als een γ-straal op je lichaam invalt, ioniseert die ______________ een molecule.

b Als er ioniserende straling op je lichaam invalt, veroorzaakt dat ______________ kanker.

c Kanker wordt ______________ veroorzaakt door ioniserende straling.

6 Op 11 maart 2011 vond er in de kerncentrale van Fukushima een kernramp plaats als gevolg van een zeebeving en een daaropvolgende tsunami. Hoewel de kernreactoren werden stilgelegd, bleef de temperatuur in de centrale oplopen omdat de koelsystemen beschadigd waren. Daardoor vond er in de drie kernreactoren een gedeeltelijke smelting plaats, waarbij ook grote hoeveelheden radioactieve stoffen vrijkwamen. Er werden zo'n 150 000 mensen geëvacueerd.

▲ Fukushima na de tsunami

a Onmiddellijk na de beving werden de drie kernreactoren stilgelegd door middel van een noodstop. Wat heeft men heel concreet gedaan om de splitsingsreacties te stoppen?

____

____

b Was de vermenigvuldigingsfactor f groter dan, gelijk aan of kleiner dan 1 nadat de noodstop werd ingeschakeld?

☐ groter dan 1 ☐ gelijk aan 1 ☐ kleiner dan 1

Verklaar je antwoord.

____

____

____

c Stopten alle splitsingsreacties onmiddellijk nadat de noodstop werd ingeschakeld?

☐ Ja, ze stopten onmiddellijk.

☐ Nee, ze stopten niet.

Verklaar je antwoord.

____

____

____

____

7 Aardappelen worden bestraald met γ-stralen om kiemvorming te voorkomen.

▲ Symbool voor voedsel dat bestraald werd

▲ Aardappelen

Welke uitspraak is correct?

- ☐ Na de bestraling bevatten de aardappelen zowel natuurlijke als kunstmatige radionucliden. De radionucliden blijven na de bestraling een tweetal dagen in een opslagplaats liggen, tot de activiteit van de kunstmatige radionucliden verwaarloosbaar klein geworden is ten opzichte van de activiteit van de natuurlijke radionucliden.
- ☐ Na de bestraling bevatten de aardappelen zowel natuurlijke als kunstmatige radionucliden. De activiteit van de kunstmatige radionucliden is echter verwaarloosbaar klein ten opzichte van de activiteit van de natuurlijke radionucliden. De aardappelen zijn veilig voor consumptie.
- ☐ Na de bestraling bevatten de aardappelen enkel natuurlijke radionucliden. Ze zijn veilig voor consumptie.

8 Lees de onderstaande krantenkoppen.

Is er gevaar is voor besmetting, bestraling of beide? Leg uit.

A

Radioactief afvalwater kerncentrale Fukushima wordt in zee geloosd

Uit: *businessam.be*, 16/10/2020

☐ bestraling ☐ besmetting

B

Radioactief afvalwater kerncentrale Fukushima wordt in zee geloosd

Uit: *businessam.be*, 16/10/2020

☐ bestraling ☐ besmetting

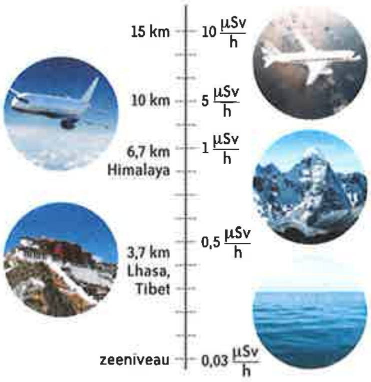
C

Greenpeace vindt sporen van radioactiviteit bij Umicore Olen en in Molse Nete

Uit: *standaard.be*, 10/12/2020

☐ bestraling ☐ besmetting

9 Aan welke effectieve dosis word je blootgesteld gedurende een trans-Atlantische vlucht van tien uur op vijftien kilometer hoogte?



Meer oefenen? Ga naar iDiddit.

HOOFDSTUKSYNTHESE

kennisclip

KERNBEGRIPPEN	NOTITIES
kernfusie	Lichte kernen worden samengevoegd tot een zwaardere kern. Er komt veel energie vrij.
kernsplitsing	Zware kernen worden gesplitst in twee lichtere kernen. Er komt veel energie vrij.
kerncentrale	Een kerncentrale is een elektriciteitscentrale waar gebruik wordt gemaakt van kernsplitsing om elektriciteit op te wekken.
kettingreactie	Bij elke kernsplitsing komen neutronen vrij die nieuwe kernsplitsingen veroorzaken. Dat domino-effect is een kettingreactie.
vermenigvuldingsfactor f	De vermenigvuldigingsfactor drukt uit of een kernreactie explosief is, in evenwicht is, of zal stilvallen. $f < 1$: de kettingreactie valt stil. $f = 1$: situatie in kerncentrales. De kettingreactie onderhoudt zichzelf zonder explosief te worden. $f > 1$: situatie in atoombommen. De kettingreactie is explosief.
moderator	De moderator verhoogt de vermenigvuldiginsfactor en is vaak water of grafiet.
controlestaven	Controlestaven worden in kerncentrales gebruikt om de vermenigvuldigingsfactor te verlagen.
lichaamsschade door ioniserende straling	**Ioniserende straling** kan atomen en moleculen in het lichaam ioniseren. Blijvende lichaamsschade ontstaat als er te veel moleculen vernietigd worden of als het lichaam gewijzigde kopieën van kapotte moleculen maakt. In dat laatste geval kan er kanker ontstaan.
besmetting	**Rechtstreeks contact** met radionucliden is **besmetting**. Je moet de stralingsbron verwijderen om verdere lichaamsschade te voorkomen.
bestraling	**Onrechtstreeks contact** met radionucliden is **bestraling**. Je wordt dan bestraald vanop een afstand. Je kunt lichaamsschade vermijden door de blootstellingsduur te beperken, afstand te houden van de bron en/of afscherming te voorzien.
sievert	**Sievert** (Sv) is de eenheid van effectieve dosis (H_{eff}). Die dosis is een maat voor de mogelijke **biologische schade**.
gemiddelde jaarlijkse effectieve dosis	De **gemiddelde jaarlijkse effectieve dosis** van een Belg bedraagt **4 mSv**: • 2,5 mSv als gevolg van natuurlijke radioactiviteit; • 1,5 mSv als gevolg van kunstmatige radioactiviteit, bijna uitsluitend door medische toepassingen.
dosislimiet	Wie beroepshalve **niet** in contact komt met ioniserende straling, mag maximaal 1 mSv per jaar bovenop de achtergrondstraling oplopen.

Notities

Notities

Notities